

Turpeen ja turvemaiden käytön kasvihuonevaikutukset Suomessa



Turpeen ja turvemaiden käytön kasvihuonevaikutukset Suomessa

Tutkimusohjelman loppuraportti

Julkaisun nimi:
Turpeen ja turvemaiden käytön kasvihuonevaikutukset Suomessa.
Tutkimusohjelman loppuraportti

Julkaisija:
Maa- ja metsätalousministeriö

Toimittaja:
Sakari Sarkkola

Valokuvat:
Sakari Sarkkola, Jyrki Hytönen, Sanna Saarnio, Mikulas Cernota, Mika Yli-Petäys

Kannen kuvat:
Sakari Sarkkola

ISBN 978-952-453-349-2
ISSN 1238-2531

Taitto:
Paavo Ojanen

Kirjapaino:
Vammalan Kirjapaino 2007

Alkusanat

Turve on Suomelle kansallisesti merkittävä kotimainen polttoaine, jolla on työllisyysvaikutuksineen myös aluepoliittista merkitystä. Vuoden 2001 Kansalliseen ilmastostrategiaan (VNS 1/2001 vp) perustuen KTM tilasi tammikuussa 2001 kartoituksen turpeen elinkaarianalyysin lisätutkimustarpeista. Kartoituksen tavoitteena oli ”arvioida mitä tietoa tarvitaan, jotta turpeen käytöstä aiheutuvien päästöjen laskentaan Kioton pöytäkirjan periaatteiden mukaisesti voitaisiin tieteellisin perustein ehdottaa turpeen elinkaaren paremmin huomioonottavia laskentamenetelmiä, mikäli edellytyksiä siihen on”. Tavoitteiden taustalla olivat myös Suomen kansalliset raportointivelvoitteet YK:n ilmastopöytäkirjalle (UN/FCCC) turpeen ja turvemaiden kasvihuonekaasupäästöistä, joiden lukuarvoja pyrittiin tarkentamaan.

Selvityksen pohjalta aloitettiin laaja tutkimusohjelma ”Turpeen ja turvemaiden käytön kasvihuonevaikutukset Suomessa”. Tutkimuksen luonteen vuoksi huomattavia maastomittausresursseja vaatinutta nelivuotista ohjelmaa rahoittivat ja ohjasivat yhteistyössä KTM, MMM ja YM. Ohjelma koostui useista hankkeista, jotka vastasivat eri maankäyttömuotojen kasvihuonekaasutaseiden tutkimuksesta. Hankkeiden työskentely tapahtui tutkijaryhmissä seuraavissa yliopistoissa ja tutkimuslaitoksissa: Helsingin yliopisto, Joensuun yliopisto, Kuopion yliopisto, Metsäntutkimuslaitos, Geologian tutkimuskeskus, VTT ja Ilmatieteen laitos.

Ohjelman tuottamien tulosten perusteella on voitu merkittävästi tarkentaa soiden maankäytön aiheuttamien kasvihuonekaasuvaikutusten päästökertoimia kansallista kasvihuonekaasuraportointia varten, ja tältä pohjalta on elinkaarianalyysien perusteella selvitetty turpeen energiakäytön mallit, jotka aiheuttavat mahdollisimman pienen kasvihuonevaikutuksen.

Osittain ohjelmassa saatuihin tuloksiin perustuen turpeen luokittelu IPCC:n 2006-ohjeistossa päästölähdeluokassa energia on muuttunut siten, että turve luokitellaan omaksi luokakseen fossiilisten energialähteiden ja biomassan väliin. Raportoinnissa päästöjen laskenta perustuu kuitenkin vain poltossa syntyvien päästöjen laskentaan, eikä koko elinkaaren aikaisia päästöjä voida raportoida kokonaisuutena Kioton pöytäkirjan alla.

Parkano, 28.9.2007

Jukka Laine
tutkimusohjelman koordinaattori

Sisällysluettelo

Yhteenveto	6
Tausta ja tietotarpeet	6
Tutkimusohjelma "Turpeen ja turvemaiden käytön kasvihuonevaikutukset Suomessa" 2002–2005	6
Soiden käyttö ja kasvihuonekaasujen taseet	7
Turpeen energiakäytön kasvihuonevaikutus elinkaarinäkökulmasta	10
Loppupäätelmät	12
 1. Tutkimusohjelman tausta ja tavoitteet	 14
 2. Tutkimusohjelman toteutus	 16
 3. Soiden ja turpeen käyttö kasvihuonekaasujen lähteenä	 17
3.1. Luonnontilaiset suot kasvihuonekaasujen sitoijina ja päästäjinä	17
3.1.1. Tausta	17
3.1.2. Tutkimuksen tavoitteet	17
3.1.3. Tutkimusmenetelmät ja keskeiset tulokset	17
3.1.4. Johtopäätökset	21
3.2. Kasvihuonekaasupäästöt metsäojitetuilta soilta ja niihin vaikuttavat ympäristötekijät	22
3.2.1. Tausta	22
3.2.2. Tutkimusmenetelmät ja tavoitteet	22
3.2.3. Tulokset	23
3.2.4. Johtopäätökset	26
3.3. Viljeltyjen ja viljelemättömien turvepeltojen kasvihuonekaasupäästöt	27
3.3.1. Tausta ja tavoitteet	27
3.3.2. Aineisto ja menetelmät	28
3.3.3. Tulokset	29
3.3.4. Johtopäätökset	30
3.4. Suopeltojen ja suonpohjien metsittämisen vaikutus kasvihuonekaasujen taseisiin	31
3.4.1. Tausta	31
3.4.2. Tutkimusaineisto ja -menetelmät	31
3.4.3. Tulokset	33
3.4.4. Tulosten tarkastelu	35
3.4.5. Johtopäätökset	36

3.5. Ekosysteemitason hiilinielumittaukset	37
puustoisilla turvemailla	
3.5.1. Tausta ja tavoitteet	37
3.5.2. Tutkimusaineisto ja menetelmät	37
3.5.3. Tulokset	38
3.5.4. Johtopäätökset	39
3.6. Soistetut suonpohjat ja niiden hiilikaasudynamiikka	40
3.6.1. Tausta ja tavoitteet	40
3.6.2. Aineisto	40
3.6.3. Tulokset	41
3.6.4. Johtopäätökset	45
4. Soiden maankäytön päästökertoimet, epävarmuustarkastelu ja jatkotutkimustarpeet	46
4.1. Tausta	46
4.2. Aineisto ja menetelmät	46
4.3. Päästökertoimiin vaikuttavia tekijöitä eri turvemailla	47
4.4. Turpeennoston kaasupäästöt ja turvepohjien jatkokäyttö	49
4.5. Tulevaisuuden näkymät	50
4.6. Johtopäätökset	51
5. Polttoturpeen eri hyödyntämisketjujen ilmastovaikutus Suomessa elinkaarinäkökulmasta	52
5.1. Tausta ja tavoitteet	52
5.2. Energiaturpeen elinkaaren kasvihuonevaikutuksen arvioiminen	52
5.3. Tarkasteltavat energiaturveketjut	53
5.4. Laskelmien lähtöarvot	55
5.5. Tulokset	56
5.6. Herkkyysanalyysi	59
5.7. Tulosten tarkastelu	61
5.8. Johtopäätökset	62
6. Tutkimusohjelman loppupäätelmät	63
Tutkimusohjelmassa julkaistut tutkimusartikkelit	64
Oheiskirjallisuutta	64
LIITTEET	68
Turpeen ja turvemaiden käytön kasvihuonevaikutukset Suomessa -tutkimusohjelman osahankkeet ja niiden tutkijat	

Yhteenveto

Tausta ja tietotarpeet

Suot ovat luonnontilaisina hiiltä kerryttäviä ekosysteemejä. Viimeisen jääkauden jälkeen Suomen soihin on arvioitu kertyneen hiiltä n. 5,7 mrd. tonnia ja ne muodostavat Suomessa maaperän suurimman hiilivaraston. Maamme alun perin lähes 10 miljoonasta suohehtaasta on kuivatettu metsätaloustalouteen n. 5,4 milj. ha ja maatalouteen n. 0,7 miljoonaa hehtaaria. Energia- ja ympäristöturpeen tuotannossa on suota yhteensä n. 60 000 ha. Luonnontilassa on n. 40 % alkuperäisestä suoalasta.

Turpeen poltto kattaa 5–6 prosenttia Suomen kokonaisenergian tarpeesta. Turve on Suomelle kansallisesti merkittävä polttoaine, jolla on työllisyysvaikutuksineen myös aluepoliittista merkitystä. Kansainvälisissä tilastoissa (OECD/IEA/Eurostat) turve rinnastetaan fossiilisiin polttoaineisiin. Suomessa turve luokitellaan hitaasti uusiutuvaksi biomassapolttoaineeksi käytetyn turve-esiintymän pitkän uusiutumisaikaväliseksi. Vuoden 2001 **Kansallisen ilmastostrategian** (VNS 1/2001 vp) mukaan lähtökohtana pidettiin sitä, "että turve jätetään energiaverotusta koskevien direktiivien ulkopuolelle kansalliseen toimivaltaan. **Kansainvälisessä tilastointikäytännössä esitettiin toimittavan sen hyväksi, että turve irrotetaan fossiilisten polttoaineiden kategoriasta erilleen omaksi luokakseen.**" Lisäksi todettiin, että "ilmastosopimuksen ja muun kansainvälisen yhteistyön osalta toimitaan seuraavasti:

- Turpeen energiakäytön elinkaarianalyysiä varten kartoitetaan lisätutkimustarpeet ja käynnistetään kartoituksen pohjalta tutkimusohjelma.
- Mikäli tutkimustulosten pohjalta on perusteltua, ryhdytään toimenpiteisiin, joilla vaikutetaan kasvihuonekaasujen laskentatapojen sääntöihin ja määritelmiin kansainvälisessä ilmastosopimuksessa. Tavoitteena on, että ilmastosopimuksen laskentamenetelmät ottavat huomioon turpeen kasvihuonekaasutaseen koko elinkaaren ajalta eikä vain poltosta tulevia päästöjä.
- Ilmastosopimukseen vaikuttamiseksi tarvitaan uuden tutkimustiedon lisäksi selkeät kriteerit turpeen energiakäytölle. Kriteereistä tulee ilmetä mm. niiden suoalueiden määrittely, joille energiaturpeen tuotanto suunnataan ja vaatimukset turpeen tuotantoalueiden jälkikäytölle"

Ilmastostrategian valmisteluun perustuen KTM tilasi tammikuussa 2001 kartoituksen turpeen elinkaarianalyysin lisätutkimustarpeista. Kartoituksen tavoitteeksi asetettiin "arvioida mitä tietoa tarvitaan, jotta turpeen käytöstä aiheutuvien päästöjen laskentaan Kioton pöytäkirjan periaatteiden mukaisesti voitaisiin tieteellisin perustein ehdottaa turpeen elinkaaren paremmin huomioonottavia laskentamenetelmiä, mikäli edellytyksiä siihen on".

Tavoitteiden taustalla olivat myös Suomen kansalliset raportointivelvoitteet YK:n ilmastosopimukselle (UN/FCCC) turpeen ja turvemaiden kasvihuonekaasupäästöistä, joiden lukuarvoja pyrittiin tarkentamaan.

Valmistuneen kartoituksen (Minkinen ja Laine 2001) perusteella perustettiin KTM:n MMM:n ja YM:n rahoituksella nelivuotinen tutkimusohjelma (2002–2005), jonka päätavoitteena oli selvittää turpeen ja turvemaiden käytöstä aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt Suomessa.

Tutkimusohjelma "Turpeen ja turvemaiden käytön kasvihuonevaikutukset Suomessa" 2002–2005

Ohjelma on koostunut yhdeksästä koordinaatiohankkeen alla toimineesta tutkimushankkeesta, joista osa on ollut "menetelmähankkeita" ja osa tiettyyn maankäytön sektoriin liittyviä hankkeita:

Ohjelman hankkeiden tavoitteina on ollut laatia mallit (dynaamiset päästökertoimet) eri maankäytössä olevien turvemaiden KHK-taseille ja kvantifioida niiden taustalla olevat ekosysteemien prosessit. Tutkimusten tieteellisiä tuloksia on raportoitu erikoisnumerona julkaisusarjassa Boreal Environment Research ja löytyvät osoitteesta:

<http://www.borenv.net>.

Ohjelmassa kehitettyjä päästökertoimia on jo käytetty Suomen uusissa kasvihuonekaasupäästölaskelmissa ja vuosittaisissa YK:n ilmastositomukselle tehdyissä inventaarioraporteissa, ja Kioton koera-portoinnissa 2007.

Ohjelman tuottamaa uusinta tietoutta käytettiin lähdeaineistona myös IPCC:n uusimmassa päästöjen laskentamenetelmien ohjeistossa (IPCC 2006 Guidelines, hyväksytty IPCC-paneelin kokouksessa huhtikuussa 2006 Mauritiuksella). Osittain tutkimusohjelman tuloksiin perustuen turpeen luokittelu IPCC:n 2006-ohjeistossa päästölähdeluokassa energia on muuttunut siten, että turve luokitellaan omaksi luokakseen fossiilisten energialähteiden ja biomassan väliin. Raportoinnissa päästöjen laskenta perustuu kuitenkin vain poltossa syntyvien päästöjen laskentaan, eikä koko elinkaaren aikaisia päästöjä voida raportoida kokonaisuutena Kioton pöytäkirjan alla, mutta osittain se on mahdollista YK:n ilmastositomuksen mukaisessa raportoinnissa.

Eri maankäyttöluokille lasketut päästökertoimet pohjautuvat eri puolilla Suomea tehtyihin monivuotisiin mittauksiin.

Soiden käyttö ja kasvihuonekaasujen taseet

Suomen alun perin lähes 10 miljoonasta suohehtaasta on ojitettu metsätalouskäyttöön n. 5,4 milj. ha ja n. 0,7 miljoonaa hehtaaria maatalouteen, jolloin luonnontilassa on n. 4 milj. hehtaaria. Suurin osa nykyään polttoturpeen tuotannossa olevasta alasta on ennen käyttöönottoa ollut metsäojitettua suota, mutta myös luonnontilaisia soita on jonkin verran otettu tuotantoon. Sen sijaan viljelykäytössä olleita soita on turvetuotannossa vain vähän turpeenostaloina perinteiseen tuotantomenetelmään liittyvien ongelmien vuoksi. **Ilmastovaikutusten kannalta turvetuotanto on luonnollisesti syytä suunnata alueille, joiden ihmistoiminnasta johtuvat kasvihuonekaasupäästöt ovat suuret, jolloin niiden lopettaminen polttoturpeen tuotannon takia kompensoi kokonaistaseessa osan polton päästöjen kasvihuonevaikutuksesta. Samasta syystä tuotannosta vapautuvien alueiden jälkikäyttö on suunniteltava siten, että elinkaarimielessä suon hyödyntämisen kasvihuonevaikutus on mahdollisimman pieni.**

Luonnontilaisten soiden kasvihuonekaasutaseet taustana soiden ja turpeen käytön vaikutuksille

Tässä tutkimusohjelmassa tarkasteltiin ojittamattomien soiden hiilitasetta mittaamalla hiilidioksidin ja metaanin vaihtoa sekä kohosuon että sarasuon ja ilmakehän välillä. Näiden hiiltä sisältävien kaasujen tase muodostaa suurimman osan suon hiilitaseesta. Yhteyttämisessä hiilidioksidia sitoutuu kasvibiomassaan. Hajotustoiminta palauttaa valtaosan sidotusta hiilidioksidista takaisin ilmakehään. Hapettomassa hajotuksessa muodostuu myös metaania (CH₄), josta osa vapautuu ilmakehään. Metaani on GWP-kertoimensa (Global Warming Potential, YK:n ilmastopaneeli) mukaan hiilidioksidia noin 20 kertaa voimakkaampi kasvihuonekaasu, kun päästöä tarkastellaan sadan vuoden aikajänteellä.

Kaasujen vaihto ja sen seurauksena suon koko hiilitase on herkkä säätekijöiden vaihtelulle. Sarasoiden vuotuinen hiilidioksiditase voi vaihdella yli 1 000 kg ha⁻¹ hiilen nettohävikistä lähes samansuuruiseen nettokertymään. Vastaavasti rahkasoilla hiilidioksidin vuositaseen on havaittu vaihdelleen hiilen 850 kg:n nettohävikistä 670 kg:n nettokertymään. Metaanipäästö sarasoilta vaihtelee <15–530 kg:aan hehtaarilla ja vastaavasti rahkasoilla <15–200 kg. Märkyys hidastaa hajotustoimintaa niin paljon, että osa kuolleesta kasvimassasta on pitkällä aikavälillä varastoitunut turpeeksi. Jääkauden jälkeinen keskimääräinen hiilikertymä soihimme on ollut sarasoilla 170 kg ja kohosoilla 210 kg hehtaarilla vuodessa. Kesäkuivuuksien yleistymisen merkitsee vedenpinnan alentumista myös soilla. Vedenpinnan yläpuolelle jäävästä turvekerroksesta hapettuu tällöin lähivuosisikymmeninä kertynyttä orgaanista ainesta tavallista nopeammin, mikä on useiden havaintojen mukaan johtanut turpeen nettohävikkiin sekä sara- että kohosoilla.

Metsätalous on merkittävin soiden maankäyttömuoto

Aiempien tutkimustulosten mukaan metsäojitettujen soiden maaperä oli merkittävä hiilidioksidin nielu, mutta tutkimusohjelmassa tehdyt mallisimulaatiot antavat päinvastaisia tuloksia. Näiden mukaan maaperän hiilitase on Suomen metsäojitetuilla soilla keskimäärin negatiivinen,

Taulukko 1. Esimerkki metsäojitetun suon maaperän CO₂-taseen muodostumisesta eri ravinteisuustasojen soilla. Negatiiviset arvot tarkoittavat aineen nettopoistumaa ekosysteemistä ilmakehään.

	Karikekertymä g C m ⁻² a ⁻¹	Maan vanhan orgaanisen aineen ja uuden karikkeen hajotus	Maaperän C-tase
Keskiravinteinen suo	500 [1 834 g CO ₂]	-572 [2 099 g CO ₂]	-72 [264 g CO ₂]
Niukkaravinteinen suo	496 [1 818 g CO ₂]	-491 [1 799 g CO ₂]	+5 [+18 g CO ₂]

Kerroin C => CO₂ on 3,667

joskin puustoon sitoutuva hiili voi kompensoida maaperän päästöt. Simulointeihin sisältyy tois-
laiseksi merkittävässä määrin epävarmuutta, ja nyt käynnistyneet jatkotutkimukset varmistavat tulok-
sen lähi vuosina.

Metsäojitusalueiden maaperän vanhan orgaanisen aineen (turve ja humus) hapellinen hajotus hiilidioksidiksi muodostaa suometsien hiilitaseen suurimman poistuman. Tämä maaperän hiili-
dioksidivuoto ilmakehään on laskelmien mukaan 6 050–16 900 kg hehtaarilta vuodessa suon ravintei-
suustasosta riippuen. Vuo on suurin runsasravinteisilla tyypeillä ja pienintä niukkaravinteisimmilla
ojitusalueilla. Suurin osa suometsistämme kasvaa karuilla ja keskiravinteisilla kasvupaikkatyypeillä,
joilta keskimääräiset vuotuiset CO₂-päästöt näyttäisivät simulaatioiden mukaan asettuvan välille
7 700–10 600 kg ha⁻¹ hiiltä. Poistumaa aiheuttavat myös mm. veteen liunneen orgaanisen aineksen
huuhtoutuminen, suuruusluokaltaan 60–100 kg hiiltä hehtaarilta vuodessa, ja mahdolliset metsäpalot.
Osa maaperän päästöstä korvautuu puuston ja metsäkasvillisuuden kariketuoannolla, joka tuo sekä
maan päälle että maaperään (turpeeseen) uutta orgaanista ainetta, jolloin hiilen kokonaistase voi jäädä
positiiviseksi tai negatiiviseksi (Taulukko 1).

Ojitusalueillakin muodostuu metaania vedenpinnan ollessa korkealla, mutta suurimmillaankin vuotui-
nen metaanipäästö vähäpuustoisilla karuilla tyypeillä jää mittausten mukaan alle 30 kg metaania heh-
taaria kohden. Tehokkaasti ojitetut alueet ovat usein heikkoja metaaninieluja, joissa metaanin kulutus
ilmakehästä jää alle 7,5 kg hehtaarilla vuodessa. Typpioksiduulia (N₂O) voi vapautua merkittäviä mää-
riä vain runsasravinteisilta tai typpilannoitetuilta turvekankailta. **Typpioksiduulia vapautuu vähäisiä
määriä (keskimäärin n. 2 kg hehtaarilta vuodessa), mutta suuren kasvihuonevaikutuksensa
vuoksi (n. 300 kertaa CO₂) tämä päästölähde voi olla merkittävä lisä ojitetujen soiden kokonais-
päästöissä.** Käynnissä olevat lisätutkimukset tarkentavat arviota lähitulevaisuudessa.

Turpeenostoalueiden päästökertoimet saatiin luotettavammiksi tässä tutkimuksessa tehtyjen uusien mittausten avulla.

Suurin osa mitatuista kaasuvirroista oli samaa suuruusluokkaa kuin harvat aiemmin saadut tulokset,
mutta yllättäviäkin havaintoja kertyi. Erityisen lämpimissä ja kosteissa oloissa jyrshinturvekenttä voi
päästää lähes viisinkertaisen määrän hiilidioksidia (40 300 kg) hehtaarilta keskimääräiseen arvioon
9 400 kg verrattuna. Aumavarastointi voi kaksinkertaistaa jyrshinturvekentän hiilidioksidipäästön, jos
aumojen vuotuiseksi pinta-alaksi oletetaan 10 % kentän alasta. Kentät ovat myös kohtalaisia metaanin
(3–90 kg hehtaarilta) ja heikkoja typpioksiduulin lähteitä (2–5 kg hehtaarilta).

Uusi tutkimus on vahvistanut ja tarkentanut tiedot maatalouskäytössä olevien soiden merkittävistä hiilidioksidin ja typpioksiduulin päästöistä

Alla esitettävät päästöjen vaihteluvälit on poimittu mittauksiin perustuvista uusista tutkimuksista. Typ-
pioksiduulin päästöjen syynä ovat paitsi turpeen luonnostaankin suuret hiili- ja typpivarat, erityisesti
lannoituksen typpilisäys. Vaikka päästöt ovat herkkiä sääolosuhteille, säätekijöiden vaihtelulla kyetään
suoraan ennustamaan vain pieni osa päästöistä. Päästöarvioihin on lisättävä epävarmuustekijä, joka
kasvattaa vaihteluvälejä merkittävästi varsinkin typpioksiduulilla (Taulukko 2).

Taulukko 2. Suopeltojen vuotuiset kasvihuonekaasupäästöt. Minimit ja maksimit edustavat kullakin viljelystyyppillä havaittuja arvoja. Negatiiviset arvot tarkoittavat aineen nettosidontaa ilmakehästä ekosysteemiin.

KHK	Keskimäärin viljelysmailla	Nurmi	Vilja	Kynnös	Hylätty
CO ₂ , g m ⁻² v ⁻¹					
Keskimäärin	2 072	1 485	1 760	2 971	1 188
Min–Max	290–4 033			2 167–4 033	–330–3 300
CH ₄ , g m ⁻² v ⁻¹					
Keskimäärin	0,42	1,27	–0,43	0,41	–0,22
Min–Max	–0,49–0,91	0,11–0,91	–0,49–0,51	–0,35–4,00	
N ₂ O, g m ⁻² v ⁻¹					
Keskimäärin	1,74	0,85	1,74	2,63	1,29
Min–Max	0,17–5,81	0,17–1,56	0,85–3,79	0,60–5,81	

Sekä kynnöksellä että kasvipeitteen alla olevan turvepellon kaasupäästöt ovat samaa suuruusluokkaa, kynnökseltä vapautuu vuodessa 25 300–40 300 kg, nurmiviljelyssä 2 900–27 500 kg ja ohrapelloilta 7 700–30 400 kg hehtaarilta hiilidioksidiä. Vastaavat vuotuiset typpioksiduulipäästöt ovat kynnöksellä pidetyillä turvepelloilla 6–58 kg ha⁻¹. Nämä ovat tyyppillisesti korkeammat kuin kasvipeitteisillä turvepelloilla, joiden vuosipäästöt haarukoituvat viime vuosien mittauksissa 2–37 kg hehtaarilta. Typpioksiduulin päästöstä uusien havaintojen mukaan jopa 25–60 % ajoittuu talvikauteen. Metaanin osalta turvepellot ovat heikkoja sitoja, sillä pohjaveden pinta pysyttelee turvepelloilla varsin syvällä. Turvepellot ovat heikkoja päästölähteitä silloin kun turve kastuu ja sen happipitoisuus alenee. Viljelyksestä jääneillä ns. peltoheitoilla kaasupäästöt näyttäisivät jatkuvan lähes samansuuruisina vielä vuosikymmeniä viljelyn päätyttyäkin.

Taulukko 3. Vuotuiset kasvihuonekaasupäästöt maan orgaanisen aineen hajotuksesta johtuen metsitetyillä pelloilla ja turvepohjilla. Negatiiviset arvot tarkoittavat aineen nettosidontaa ilmakehästä ekosysteemiin. Huom! Maan ja koko ekosysteemin CO₂-taseen laskemiseksi päästöstä täytyy vähentää ko. metsikön puustoon ja karikkeeseen sitoutuva hiilimäärä, joka vaihtelee puulajin ja kasvupaikkatyyppin mukaan.

KHK	Metsitetyt viljelysmaat	Metsitetyt turvepohjat
CO ₂ , g m ⁻² v ⁻¹		
Keskimäärin	1 354	1 397
Min–Max	759–1 976	1 008–1 756
CH ₄ , g m ⁻² v ⁻¹		
Keskimäärin	–0,15	–0,05
Min–Max	–0,43–0,81	–0,03–0,09
N ₂ O, g m ⁻² v ⁻¹		
Keskimäärin	1,02	0,15
Min–Max	0,16–4,71	0,02–0,75

Suopeltojen ja turvetuotannosta jääneiden suonpohjien metsittämisen on arvioitu pienentävän kasvihuonevaikutusta ja uudet tulokset näyttävät tukevan tätä arviota

Tulokset osoittavat kuitenkin, että **maaperän päästöt eivät vähene niin paljon, että puustoon sitoutuva hiilimäärä muuttaisi kokonaistaseen positiiviseksi**. Hiilidioksidin vuotuinen hehtaarikohtainen päästö turpeen ja vanhan karikkeen hajotessa metsitetyillä turpeennostoalueilla oli 10 100–19 800 kg ja metsitetyillä turvepelloilla 7 600–19 800 kg (Taulukko 3), mikä on samaa suuruusluokkaa tai jopa suurempi kuin metsäojitusalueilla, mutta selvästi alempi kuin metsittämättömillä turvepelloilla. Kun maaperän CO₂-päästöstä vähennetään puustoon vuosittain sitoutuva hiilidioksidi, olettaen vuosikasvuun sitoutuneeksi määräksi 1 650–12 100 kg hehtaarilla, jäänee koko ekosysteemin hiilidioksiditase useimmissa tapauksissa tappiolliseksi. Näistä luvuista puuttuvat pintakasvillisuuden ja kertyvän karikkeen sitoma hiili, mutta mikrometeorologiset mittaukset metsitetyillä pellolla vahvistavat arviota, että metsitetty pelto säilyy pienenä CO₂:n päästölähteenä (n. 500 kg ha⁻¹ a⁻¹). Metsittäminen hidastaa CO₂-päästöjä ainakin muutaman vuosikymmenen ajan puuston ja maanalaisen biomassan vielä kasvaessa. **Sekä metsitetyt turvepohjat että turvepellot näyttävät kuitenkin päästävän edelleen typpioksiduulia**. Peltomaasta vuotuinen N₂O-päästö havaittiin metsitettynäkin suuremmaksi, 2–60 kg ha⁻¹ kuin turvepohjalta, jossa päästöt vaihtelivat välillä 0,2–7,5 kg ha⁻¹.

Suonpohjien ennallistaminen turvetuotannon jälkikäyttömuotona sitoo hiilidioksidia pitkäaikaiseen varastoon

Ennallistamisen seurauksena on kuitenkin metaanipäästöjen käynnistyminen uudelleen uuden suon kehityksen myötä. Hiilen nettosidonta alkaa ennallistamisaloilla jo muutamassa vuodessa suokasvillisuuden tulon myötä. Suotuisissa oloissa hiilen kertyminen saattaa olla erittäin nopeaa, erityisesti koska fotosynteesi on tehokasta ja hapettoman hajotuksen lopputuotteena syntyvää metaania vapautuu vähän. Merkittävin tekijä ennallistumisen onnistumisessa on riittävä kosteus.

Metaanipäästöt seuraavat viiveellä uuden orgaanisen aineksen sidontaa. Ainakin soistumiskehityksen alussa, useiden vuosien ajan, ennallistuvan suonpohjan metaanipäästö voi olla vähäisempää kuin vastaavilla luonnontilaisilla sarasoilla. Erityisen nopeasti uutta kasvibiomassaa kerryttävä ennallistamisalue voi kuitenkin sopivissa oloissa tuottaa poikkeuksellisen suuren, jopa yli 400 kg:n vuotuisen metaanipäästön hehtaarilta. Ajan myötä hiilidioksidin sidonta voi hidastua ja metaanin vapautumiseen johtavat prosessit vakautuvat niin, että hiilikaasuvuot asettuvat ennallistetuilla alueilla luonnontilaisten soiden tasolle.

Tulokset Siikajoen maankohoamarannikon luonnonsoiden kaasutaseista tukevat päätelmiä ennallistamiskohteista. Siikajoen eri-ikäisillä kosteikoilla satavuotiaasta rantaluhdasta aina 2500-vuotiaaseen rahkasuohon asti fotosynteesi oli tehokkaimmillaan nuorimmilla aloilla ja hidastui suon iän karttuessa. Samoin metaanidynamiikka oli epävakainta nuorimmilla soilla, kun taas vanhimmat suot toimivat tasaisina metaanin lähteinä. Luonnontilaisten soiden ikäsarjalla soistumisprosessi oli paljon hitaampi kuin ihmisen säätelemillä ennallistetuilla suonpohjilla, joissa ajoittainen kuivuus ei rajoittanut kehitystä. **Vakiintuneen suokasvillisuuden muodostumisen jälkeen ennallistettu suonpohja toimi kuten luonnontilainen suo.** Koska hiilenkertymän ja suokasvillisuuden välillä on selkeä yhteys, kasvillisuutta voitaisiin käyttää yksinkertaisena tunnuksena ennallistetun suonpohjan hiilitaseen ja metaanipäästöjen arviointiin. Toisin kuin luonnontilaiset suot ennallistetut suonpohjat kuuluvat KHK-inventoinnissa raportoitaviin maankäyttöluokkiin, vaikka niiden maankäytöllä pyritään poistamaan ihmisen toiminnan vaikutus ja palauttamaan luonnontilaista vastaava tilanne. **Ennallistamista olisikin perusteltua pitää vain tilapäisenä maankäyttömuotona, jolloin alue palaa ennen ihmistoiminnan vaikutusta edeltäneeseen tilanteeseen, ja ennallistettu suo voitaisiin tietyn määräjän jälkeen jättää KHK-inventoinnin ulkopuolelle kuten ojittamattomatkin suot.**

Turpeen energiakäytön kasvihuonevaikutus elinkaarinäkökulmasta

Turve on merkittävä kansallinen polttoaine, mutta energiakäytön haittana ovat sen aiheuttamat kasvihuonekaasujen päästöt, jotka ovat kasvaneet polttoturpeen käytön lisääntymisen myötä. Maat ovat velvollisia inventoimaan ja raportoimaan kasvihuonekaasupäästönsä ilmastositoumukselle. Suomen kasvihuonekaasuinventaario ja päästökauppa rinnastavat turpeen fossiilisiin polttoaineisiin päästöjen laskennassa hallitusten välisen ilmastopaneelin (IPCC) ohjeiden mukaisesti, joskin uusien ohjeiden vuodelta 2006 mukaan turpeen polton päästöt raportoidaan omassa luokassaan erillisenä fossiilisista polttoaineista. Päästökaupan myötä turpeen tuotannon arvioidaan vähenevän erityisesti sähkön lauhdetuotannossa.

Ilmastositoumukselle raportoitavassa päästöinventaariossa pyritään mahdollisimman tarkasti esittämään ihmisen toiminnan aiheuttamat toteutuneet kasvihuonekaasujen päästöt ja nielut tarkasteluvuonna. Näin voidaan seurata kasvihuonekaasujen päästöjen todellista kehitystä ja arvioida mm. Kioton pöytäkirjan velvoitteiden toteutumista.

Kasvihuonevaikutuksen tarkasteleminen elinkaarinäkökulmasta käyttää erilaista lähestymistapaa kuin päästöinventaario. Siinä pyritään arvioimaan tuotteen kokonaisvaikutusta ottaen huomioon kaikki merkittävät päästöt ja nielut, jotka aiheutuvat tuotteesta. Tavanomaisen tuotteen ollessa kysymyksessä päästöt aiheutuvat suhteellisen lyhyen ajan kuluessa. Turvepolttoaineen tapauksessa aikajänne tuodaan mukaan tarkasteluun, johtuen turvesuon pohjan jälkikäytöstä (esim. soistaminen, metsitys tai viljely), joka aiheuttaa jopa vuosisatoja kestäviä nielu- ja päästöprosesseja. Koska

tarkasteluun otetaan huomioon kaukana tulevaisuudessa olevia päästöjä ja nieluja, lopputulos ei ole yhteensopiva inventaariotarkastelun kanssa, jossa arvioidaan vain tarkasteluvuonna toteutuneet päästöt ja nielut. Lisäksi päästöinventaarioissa raportoidaan päästöt sektoreittain ja päästöluokittain, jolloin yhden toiminnon elinkaaren, kuten turpeen energiakäytön, päästöt joutuvat useisiin päästöluokkiin (esimerkiksi poltto, korjuukoneet ja turvetuotantoalueen jälkikäyttö).

Tässä tutkimusohjelmassa tutkittiin turpeen energiakäytön kasvihuonevaikutusta elinkaarianalyysin näkökulmasta. Kasvihuonevaikutusta arvioidaan säteilypakotteella, joka kuvaa kasvihuonekaasuista aiheutuvaa maapallon säteilyenergiatasapainon häiriötä, josta seuraa ilmaston muuttuminen.

Turve-energian tuotantoketju muodostuu polttoturpeen tuotannosta eri tuotantoalueilta, turve-energian tuottamisesta polttamalla sekä turpeen tuotantoalueen jälkikäytöstä. Tutkimuksessa käsiteltiin mahdollisina turpeen tuotantoalueina luonnontilaista suoaluetta (sarasuo), metsäojitettua suota sekä maatalouskäytössä olevaa turvemaata. Turpeen tuotannon ja polttamisen jälkeen tuotantoalueen pohjan jälkikäyttövaihtoehtoina olivat soistaminen, metsitys tai ruokohelven viljely. Näistä alkutiloista ja jälkikäyttömahdollisuuksista muodostettiin tutkimuksessa useita erilaisia polttoturpeen tuotantoketjuja. Tutkimuksessa tarkasteltiin turvemaan hyödyntämistä kahdesta eri näkökulmasta: tuotantoketju rajattiin koskemaan vain turvetta tai turpeen lisäksi myös alueen jälkikäytössä tuotettu uusiutuva energia (puu-biomassa tai ruokohelpi) huomioitiin.

Tutkimushankkeessa simuloitiin polttoturpeen eri tuotantoketjujen kasvihuonevaikutuksia 300 vuoden ajanjaksolla. Tuotantoketju rajattiin koskemaan vain turve-energiaa. Jos tarkastellaan maapallon keskilämpötilan nousun rajoittamista kahden tai kolmen asteen tasolle (Euroopan Unioni on ehdottanut kahta astetta), tulee maailman kasvihuonekaasupäästöjä vähentää voimakkaasti tämän vuosisadan aikana. Tämän perusteella voidaan merkittävänä tarkasteluaikana pitää noin sataa vuotta suhteutettaessa eri polttoaineiden kasvihuonevaikutusta. **Luonnontilaisen sarasuon turvetuotantoon hyödyntämisen kasvihuonevaikutus on kivihiilen luokkaa tai jopa suurempi.** Tämä johtuu mm. hiilen sitoutumisen loppumisesta, kun suo otetaan turvetuotantoon. Kivihiilen ja turpeen kasvihuonevaikutusten arvioimisessa on käytetty yhteneväistä menetelmää, jolloin tulokset ovat vertailukelpoisia. **Myös metsäojitetun suon hyödyntäminen polttoturpeen tuotantoon aiheuttaa hieman suuremman kasvihuonevaikutuksen kuin kivihiili, ellei turvetta korjata tuotantoalueelta riittävän tarkasti. Keräämällä jäännösturve mahdollisimman tarkasti saadaan myös siihen sitoutunut energia talteen ja tarkastellun ketjun kasvihuonevaikutus laskemaan kivihiilen kasvihuonevaikutuksen tasolle.**

Nykytekniikalla ilmastolle ystävällisin turve-energian tuotantoketju on maatalouskäytössä oleva tai ollut turvema (suopelto), joka metsitetään tuotannon loputtua. Suopellon käyttöönotto turvetuotantoon lopettaa sen suuret maatalouskäyttöön liittyvät päästöt, jolloin tästä ketjusta tulee ilmaston kannalta edullinen.

Suuntaamalla turvetuotanto runsaspäästöisille soille ja käyttämällä uutta teknologiaa, voidaan energiakäytön kasvihuonevaikutus pitää selvästi kivihiilen polttoa vähäisempinä

Tutkimuksessa tarkasteltiin myös ns. "visioketjuja", jotta voitiin osoittaa pienin mahdollinen turpeen energiakäytön kasvihuonevaikutuksen taso, joka voidaan saavuttaa eri vaiheiden päästöjen minimoimisella uuden teknologian avulla. Visioketjussa A turpeen tuotantoalueena on metsäojitettu suo. Visioketjussa B turpeen tuotanto suunnataan alueille, jotka ovat ennen tuotantoa suuria kasvihuonekaasujen lähteitä (suopellot). Uuteen teknologiaan kuuluu mm. polttotekniikan parantaminen erityisesti typpioksiduulin (N_2O) päästöjen osalta sekä tuotantoajan lyhenemiseen ja tuotantokentän ja aumojen päästöjen pienentämiseen tähtäävän uuden turpeentuotantoteknologian käyttöönotto. Visioketjussa A, jossa tuotantoalueena on metsäojitettu suo, ketjun kasvihuonevaikutus on kivihiilen vaikutusta pienempi. Visioketjun B kasvihuonevaikutus lähtee laskuun jo 100 vuoden kuluttua turpeen tuottamisesta ja päätyy lähes neutraaliksi 300 vuoden kuluessa.

Uusiutuvan bioenergian tuotanto suonpohjilla, ja osittainen yhteispoltto pienentävät kasvihuonevaikutusta merkittävästi

Turvemaan hyödyntämistä sekä turvetuotantoon, että uusiutuvan bioenergian tuotantoon on myös tarkasteltu. Tarkastelussa olivat mukana tuotantoketjut joissa turpeen polton lisäksi tuotetaan pitkäaikaisesti uusiutuvaa energiaa (ruokohelpeä tai puubiomassaa) suonpohjalla turpeen tuotannon jälkeen. Tuotantoaloina olivat viljelyksessä oleva suoalue (suopelto) sekä metsäojitettu suo. Tarkasteluaikoina olivat 100 ja 300 vuotta tuotannon aloittamisesta eteenpäin. Uusiutuvan energiantuotannon avulla saadaan energiakäytön suhteellinen kasvihuonevaikutus pienenemään, ja erityisesti suopeltojen turpeen käyttö biomassan ohella vähentää kasvihuonevaikutuksen pitemmällä tarkasteluajalla murto-osaan kivihiilen vaikutuksesta. Myös uusi turpeen tuotantoteknologia vähentää kasvihuonevaikutusta.

Aiemmista suomalaisista ja ruotsalaisista tutkimuksista huomattiin, että tuloksien ollessa monin paikoin yhtäläiset myös eroavaisuuksia ilmeni. Turve-energian kasvihuonevaikutusta ei ole tutkittu muissa maissa, joten on tärkeää tunnistaa, mistä erot tarkasteluissa ja lähtöarvoissa johtuvat. Vertailututkimuksessa kävi ilmi, että suomalaisen ja ruotsalaisen tutkimuksen tieteellinen lähestymistapa sekä laskentamenetelmä olivat hyvin samanlaisia. Erona olivat pääasiassa lähtöarvot, erityisesti metsäojitettujen soiden päästöissä.

Loppupäätelmät

- Tiedot maankäytön vaikutuksista suomen soiden KHK-taseisiin lisääntyivät merkittävästi tutkimusohjelman aikana, ja eräiltä osin käsitykset kasvihuonekaasujen päästöistä muuttuivat merkittävästi.
 - Metsäojitusalueiden aiemmin positiivisena pidetty turvemaan hiilidioksiditase muuttui uusien tulosten mukaan keskimäärin negatiiviseksi.
 - Sen sijaan tieto maatalouskäytössä olevien/olleiden soiden suurista hiilidioksidi ja typpioksiduulipäästöistä sai vahvistusta uusien tulosten perusteella.
 - Jossain määrin yllättävä oli havainto, että suopeltojen metsitys ei näytä pystyvän muuttamaan kokonaiskasvihuonekaasutasetta positiiviseksi, vaikka pienentääkin päästöjä.
- Ilmastopöytäkirjalle raportoitavassa päästöinventaariorissa pyritään mahdollisimman tarkasti esittämään ihmisen toiminnan aiheuttamat toteutuneet kasvihuonekaasujen päästöt ja nielut tarkasteluvuonna. Näin voidaan seurata kasvihuonekaasujen päästöjen todellista kehitystä ja arvioida mm. Kioton pöytäkirjan velvoitteiden toteutumista.
- Kasvihuonevaikutuksen tarkasteleminen elinkaarinäkökulmasta käyttää erilaista lähestymistapaa kuin päästöinventaarior. Siinä pyritään arvioimaan tuotteen kokonaisvaikutusta ottaen huomioon kaikki merkittävät päästöt ja nielut, jotka aiheutuvat tuotteesta. Tässä tutkimuksessa turpeen energiakäytön kasvihuonevaikutuksia on tarkasteltu elinkaarianalyysin näkökulmasta.
- Turpeen energiakäyttö aiheuttaa nykyisillä hyödyntämistavoilla suunnilleen kivihiilen luokkaa olevan kasvihuonevaikutuksen. Tuloksiin liittyy kuitenkin epävarmuutta pitkien tarkasteluajanjaksojen osalta. Kun huomioidaan turvemaan hyödyntäminen turvetuotannon jälkeen pitkäaikaisesti uusiutuvan bioenergian tuotantoon, aiheuttaa turvemaan energiakäyttö kivihiieltä pienemmän kasvihuonevaikutuksen.
- Turpeen kasvihuonevaikutusta voidaan edelleen vähentää merkittävästi suuntaamalla turpeen tuotanto maatalouskäytössä oleville/olleille turvemaille ja runsaspäästöisille metsäojitusalueille, jolloin kasvihuonevaikutus laskee pitkällä ajanjaksoilla merkittävästi.

- Turve-energian kasvihuonevaikutusta saadaan pienemmäksi jäännösturpeen tarkalla keruulla, polttotekniikoiden parantamisella sekä uusilla turpeen korjuumenetelmillä. Uusiutuvan bioenergian tuotto turpeentuotannosta vapautuvilla alueilla pienentää kasvihuonevaikutusta kokonaisuutena tuotettua energiamäärää kohti. Metsitys on hieman ilmastoystävällisempi jälkikäyttövaihtoehto tuotannosta poisjääneelle suonpohjalle kuin soistaminen. Ruokohelven viljely tuottaa lähes saman ilmastovaikutuksen kuin metsitys.
- Soistamisella pyritään poistamaan ihmisen toiminnan vaikutus ja palauttamaan luonnontilaista vastaava tilanne. Siksi ennallistamista olisikin perusteltua pitää vain tilapäisenä maankäytön muutoksena ja ennallistetut suonpohjat voitaisiin tietyn määräajan jälkeen jättää KHK-inventoinnin ulkopuolelle samoin kuten ojittamattomat suot.
- Tieto soiden maankäytön kasvihuonevaikutuksista on edelleenkin hajanaista ja monilta osin puutteellista. Lisää mittaustietoa tarvitaan erityisesti puustoisten soiden hiilidioksidin nettovaihdosta (kokonaishiilitaseesta) maan etelä- ja pohjoisosissa erilaisilla turvemaatyypeillä sekä typpioksiduulin taseista rehevillä turvemailla, erityisesti suopelloilla. Suonpohjien KHK-taseista korjuun loputtua ja erilaisissa jälkikäyttömuodoissa on hyvin vähän tietoa, koska jälkikäyttöalueita on vasta muutamia. Alueiden osuus tulee kuitenkin kasvamaan merkittävästi tulevaisuudessa, ja tutkimusta tulisi lisätä tällä alueella.

Turpeen ja turvemaiden käytön kasvihuonevaikutukset Suomessa

1. Tutkimusohjelman tausta ja tavoitteet

Suot ovat luonnontilaisena hiiltä kerryttäviä ekosysteemejä. Viimeisen jääkauden jälkeen Suomen soihin on arvioitu kertyneen hiiltä n. 5,7 mrd. tonnia ja ne muodostavat Suomessa maaperän suurimman hiilivaraston. Maamme alun perin lähes 10 miljoonasta suohehtaasta on kuivatettu metsätaloustalouteen n. 5,4 milj. ha ja maatalouteen n. 0,7 miljoonaa hehtaaria. Energia- ja ympäristöturpeen tuotannossa on suota yhteensä n. 60 000 ha. Luonnontilassa on n. 40 % alkupe-raisestä suoalasta. Suurin osa nykyään energia- eli polttoturpeen tuotannossa olevasta alasta on ennen käyttöönottoa metsäojitettua suota, mutta myös luonnontilaisia soita on jonkin verran suoraan otettu tuotantokäyttöön. Sen sijaan viljelykäytössä olleita soita on turvetuotannossa turpeennostoaloina vain vähän perinteiseen tuotantomenetelmään liittyvien ongelmien vuoksi.

Turve on Suomelle kansallisesti merkittävä kotimainen polttoaine, jolla on työllisyysvaikutuksineen myös aluepoliittista merkitystä. Turpeen poltto kat- taa 5–6 prosenttia Suomen kokonaisenergian tarpeesta. Korjattavan turpeen vuotuinen energiakäyt- tö on keskimäärin n. 18 TWh ja sen hiilisisältö on n. 1,35 milj. tonnia.

Kansainvälisissä tilastoissa (OECD/IEA/Eurostat) turve rinnastetaan fossiilisiin polttoaineisiin. Suo- messa turve luokitellaan hitaasti uusiutuvaksi bio- massapolttoaineeksi käytetyn turve-esiintymän pitkän uusiutumisajan vuoksi. Vuoden 2001 Kan- sallisen ilmastostrategian (VNS 1/2001 vp) mukaan lähtökohtana pidettiin sitä, ”että turve jätetään energiaverotusta koskevien direktiivien ulkopuolelle kansalliseen toimivaltaan. Kansainvä- lisessä tilastointikäytännössä esitettiin toimittavan sen hyväksi, että turve irrotetaan fossiilisten polt- toaineiden kategoriasta erilleen omaksi luokak- seen.” Lisäksi todettiin, että ”ilmastosopimuksen ja muun kansainvälisen yhteistyön osalta toimitaan seuraavasti:

Turpeen energiakäytön elinkaarianalyysiä varten kartoitetaan lisätutkimustarpeet ja käynnistetään kartoituksen pohjalta tutkimusohjelma.

Mikäli tutkimustulosten pohjalta on perusteltua, ryhdytään toimenpiteisiin, joilla vaikutetaan kasvi- huonekaasujen laskentatapojen sääntöihin ja mää- ritelmiin kansainvälisessä ilmastopöytäkirjassa. Tavoitteena on, että ilmastopöytäkirjan laskenta- menetelmät ottavat huomioon turpeen kasvihuo- nekaasutaseen koko elinkaaren ajalta eikä vain poltosta tulevia päästöjä.

Ilmastopöytäkirjaan vaikuttamiseksi tarvitaan uuden tutkimustiedon lisäksi selkeät kriteerit tur- peen energiakäytölle. Kriteereistä tulee ilmetä mm. niiden suoalueiden määrittely, joille energiaturpeen tuotanto suunnataan ja vaatimukset turpeen tuo- tintoalueiden jatkokäytölle.”

Ilmastostrategian valmisteluun perustuen KTM tilasi tammikuussa 2001 kartoituksen turpeen elin- kaarianalyysin lisätutkimustarpeista. Kartoituksen tavoitteena oli ”arvioida mitä tietoa tarvitaan, jotta turpeen käytöstä aiheutuvien päästöjen laskentaan Kioton pöytäkirjan periaatteiden mukaisesti voitai- siin tieteellisin perustein ehdottaa turpeen elinkaa- ren paremmin huomioonottavia laskentamenetel- miä, mikäli edellytyksiä siihen on”. Tavoitteiden taustalla olivat myös Suomen kansalliset raportoin- tivelvoitteet YK:n ilmastopöytäkirjalle (UN/FCCC) turpeen ja turvemaiden kasvihuonekaasupäästöis- tä, joiden lukuarvoja pyrittiin tarkentamaan.

Ilmastovaikutusten kannalta turvetuotanto olisi jär- kevää suunnata alueille, joiden ihmistoiminnasta johtuvat kasvihuonekaasupäästöt ovat suuret, jol- loin niiden lakkaaminen polttoturpeen tuotannon takia kompensoi osan polton päästöjen kasvihuo- nevaikutuksesta. Samasta syystä tuotannosta vapautuvien alueiden jatkokäyttö olisi suunnitelta- va siten, että elinkaarimielessä suon hyödyntämi- sen kasvihuonevaikutus on mahdollisimman pie- ni.

Edellä mainituista tietotarpeista johtuen perustet- tiin KTM:n MMM:n ja YM:n rahoituksella nelivuoti- nen tutkimusohjelma (2002–2005), jonka pääta- voitteena oli selvittää turpeen ja turvemaiden käy- töstä aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt Suo- messa. Tutkimusohjelmassa on myös laadittu mallit eri maankäytössä olevien turvemaiden KHK- taseille ja kvantifioitu niiden taustalla olevat ekosys- teemien prosessit. Tutkimusohjelmaan perustet- tujen osahankkeiden tavoitteina oli selvittää luon-

nontilaisten ja erilaisessa maankäytössä olevien turvemaiden kasvihuonekaasujen taseet, ja näihin perustuen tehdä elinkaarianalyysit eri energiaturpeen korjuu- ja jatkokäyttöketjuille. Elinkaaritarkastelussa pyritään arvioimaan ilmaston kannalta turpeen käytön kokonaisvaikutusta ottaen huomioon kaikki merkittävät päästöt ja nielut, jotka aiheutuvat tuotteesta. Näkökulma poikkeaa tavanomaisesta päästöinventaariosta, jossa pyritään mahdollisimman tarkasti esittämään toiminnan

aiheuttamat toteutuneet kasvihuonekaasujen päästöt ja nielut vain tarkasteluvuoden osalta.

Tässä julkaisussa kuvataan lyhyesti tutkimusohjelmassa laadittujen tutkimusten tavoitteet, käytetyt menetelmät ja keskeiset tulokset sekä tehdään synteeseit saatujen tulosten ja aiemman tiedon perusteella. Yksityiskohtaisemmat kuvaukset tutkimuksista on luettavissa niistä laadituista tutkimusartikkeleista.

2. Tutkimusohjelman toteutus

Tutkimusohjelma on koostunut yhdeksästä koordinaatiohankkeen alla toimineesta tutkimushankkeesta, joista osa on ollut "menetelmähankkeita" ja osa tiettyyn maankäytön sektoriin liittyviä hankkeita. Ohjelman käytännön tutkimustyö on tehty yhteistyössä kolmen yliopiston ja neljän tutkimuslaitoksen kanssa. Ohjelman toteutukseen ovat osallistuneet Helsingin yliopisto, Joensuun yliopisto, Kuopion yliopisto, Metsätutkimuslaitos, Ilmatieteen laitos, Geologian tutkimuskeskus ja Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

Ohjausryhmä

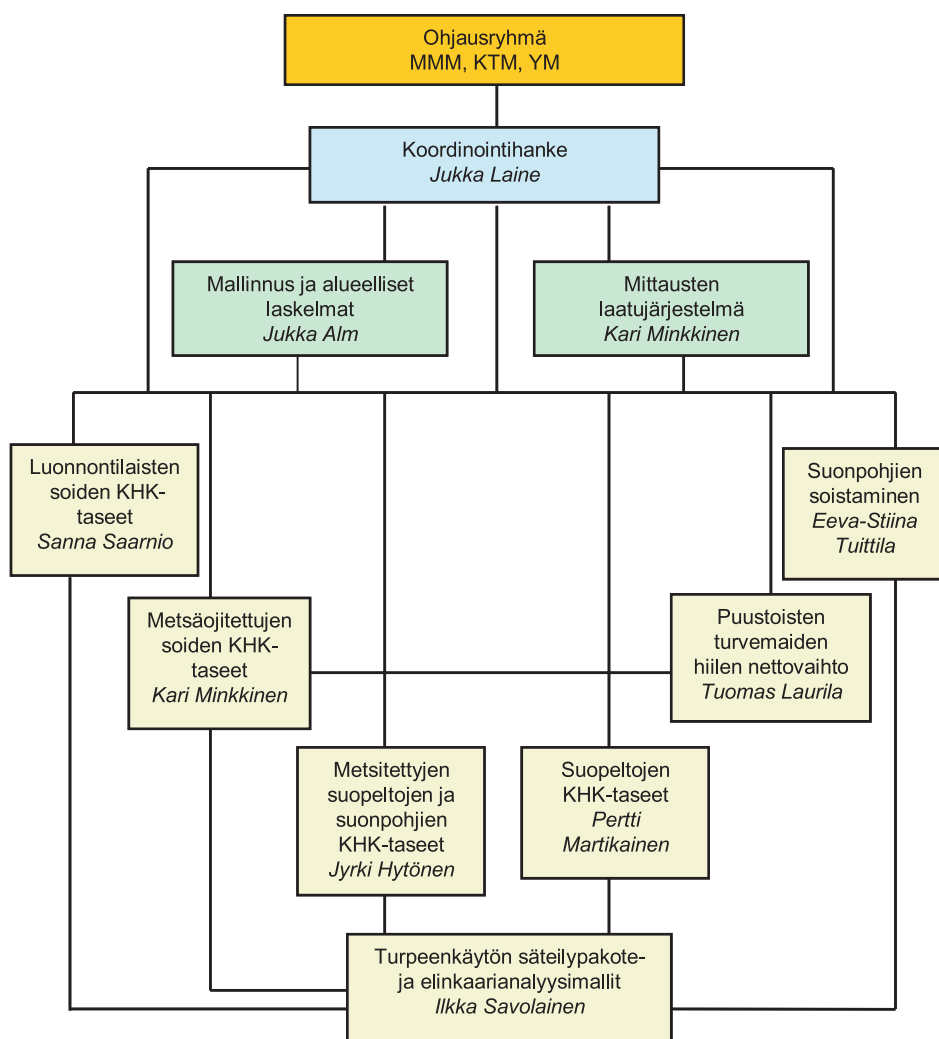
Tutkimusohjelman hankkeet, niiden liittyminen toisiinsa ja hankkeiden vastuututkijat on esitetty seuraavassa kaaviossa (Kuva 1). Tutkimushankkeisiin osallistuneet kaikki tutkijat on esitetty liitteessä (LIITE).

Rahoitus

Tutkimusohjelman hankkeiden kokonaisrahoitus ja henkilöpanostus päärahoittajittain vuosina 2002–2005 on ollut seuraava:

Rahoittaja	hlötyövuosia	Rahoitus (EUR)
KTM	10,2	562 611
MMM	9,8	447 899
YM	2,9	119 819
Muut *)	35,9	1 909 081
Yhteensä	58,8	3 039 410

*) TM, OM, Metla, VTT, Ilmatieteen laitos, HY, JoY, Vapo Oy ja Suomen Akatemian rahoitus



Kuva 1. Tutkimusohjelman rakenne ja vastuututkijat. Vihreät laatikot kuvaavat ohjelman ns. menetelmähankkeita ja keltaiset laatikot kuvaavat eri maankäyttösektoreihin liittyviä kasvihuonekaasutaseiden tutkimushankkeita.

3. Soiden ja turpeen käyttö kasvihuonekaasujen lähteenä

3.1. Luonnontilaiset suot kasvihuonekaasujen sitoja ja päästäjinä

*Sanna Saarnio, Micaela Morero,
Markku Mäkilä, Jukka Alm*

3.1.1. Tausta

Luonnontilainen suo on elinympäristö, jossa kuolleiden kasvimassan hajotus on ollut pitkällä aikavälillä hitaampaa kuin kasvien perustuotannosta jatkuvasti syntyvän karikkeen muodostuminen. Tällöin osa kasvijäännöksistä on kerrostunut turpeeksi. Perustuotannossa ilmakehän hiilidioksidia (CO_2) sitoutuu kasvillisuuteen ja toisenvaraisten eliöiden hengityksen kautta se palaa takaisin ilmakehään. Märissä elinympäristöissä hapen puute hidastaa hajotusnopeutta ja siten kuolleita kasvijäännöksiä saattaa varastoitua ekosysteemiin pitkiksi ajoiksi. Osa varastoituneesta hiilestä palaa kuitenkin ilmakehään metaanina (CH_4), jota muodostuu hapettomien hajotusketjujen lopputuotteena. Hiiltä tulee suoekosysteemiin myös sadeveden ja pohjaveden mukana ja sitä vastaavasti poistuu valumavesien mukana. Metaanin ja veteen liuenneen hiilen osuus vuotuisesta hiilitaseesta on vain muutamia prosentteja hiilidioksidin sidontaan ja hengitykseen verrattuna.

Soiden merkitys kasvihuoneilmiön kannalta on siis ollut kaksijakoinen. Boreaalisen ja subarktisen vyöhykkeen soiden on arvioitu keränneen yli viidesosan kaikesta maaperän sisältämästä hiilestä. Samalla kun suot ovat heikentäneet kasvihuoneilmiötä varastoidessaan ilmakehästä sidottua hiiltä itseensä, hapettomissa hajotusketjuissa muodostuneen metaanin vapautuminen ilmakehään on auttanut ylläpitämään luonnollista kasvihuoneilmiötä. Ihmisen toimintojen vuoksi monien kasvihuonekaasujen määrä ilmakehässä kuitenkin lisääntyy, mikä johtanee kasvihuoneilmiön voimistumiseen ja maailmanlaajuiseen ilmaston muutokseen. Ilmaston lämpeneminen ja sateiden ajallinen sekä paikallinen uudelleenjakautuminen voivat muuttaa nykyisiä elinympäristöjä ja eliöyhteisöjä sekä yhteiskunnan toimintaedellytyksiä. Myös hiilidioksidin ja metaanivuot soiden ja ilmakehän välillä muuttuvat olosuhteiden muuttuessa.

3.1.2. Tutkimuksen tavoitteet

Soihin varastoitunut hiili on nykyisin tärkeimpiä kotimaisia polttoaineitamme. Suon ottaminen energiantuotantoon lopettaa suoekosysteemin luontaisen toiminnan. Elävän kasvillisuuden poisto estää hiilidioksidin sidonnan ja kuivatus muuttaa turvekerrokset hapekkaiksi lisäten hiilidioksidin vapautumista, mutta vähentäen metaanipäästöjä hyvin pieniksi. Tämän jälkeen turve kerätään ja poltetaan, jolloin tuhansien vuosien aikana varastoitunut hiili vapautuu takaisin ilmakehään muutamassa kymmenessä vuodessa. Turpeennoston lopettamisen jälkeen alue metsitetään, uudelleensoistetaan, jätetään sinälleen tai sitä käytetään ruokohelven tuottamiseen. Kasvittuva alue alkaa vähitellen taas sitoa hiilidioksidia. Jatkokäyttömuodosta ja ilmasto-oloista riippuen hiiltä voi myös alkaa kertyä uudelleen alueelle kehittyvään ekosysteemiin. Tässä hankkeessa tutkittiin erityyppisten luonnontilaisten soiden vuotuista kasvihuonekaasujen vaihtoa ja hiilikaasutasetta nykyolosuhteissa sekä viime vuosisatojen ja -kymmenten aikana syntyntä hiilenkertymää. Tavoitteena oli tuottaa luonnontilaisille soille keskimääräiset hiilidioksidin ja metaanin vuositaseet.

3.1.3. Tutkimusmenetelmät ja keskeiset tulokset

Maastohavainnot

Tässä tutkimuksessa kerättiin kirjallisuudesta havaintoja havumetsävyöhykkeen soiden vuotuisista hiilidioksidin- ja metaanitasaisista Suomesta ja ulkomailta. Kirjallisuudesta kerätyt arvot ovat peräisin koko boreaaliselta vyöhykkeeltä Pohjois-Amerikasta, Venäjältä ja Skandinaviasta. Samalla ilmastovyöhykkeellä sijaitsevat suot kuvastavat yleisesti soiden toimintaa kyseisellä vyöhykkeellä.

Kirjallisuuskatsauksen lisäksi mitattiin hiilikaasujen vaihtoa kahdella erilaisella suolla Anjalankoskella, Kymenlaaksossa. Tutkimuskohteet, vähäpuustoinen ombrotrofinen keidasrämme (Haukka-suo, 60°49'N 26°57'E) ja toisen keidasrämmeen minerotrofinen nevalaide (Hangassuo, 60°47'N 26°54'E), valittiin siten, että ne täydentävät aiempien runsaasti tutkittujen alueiden ja muiden osahankkeiden kohdeverkostoa. Elinkaariallyseissa suot jaetaan kahteen pääryhmään, hyvin niukkaravinteisiin sadeveden varassa eläviin eli ombrotrofiin soihin ja sadeveden lisäksi pohja- ja valumavedestä ravinteita saaviin eli minerotrofi-



Kuva 2. Tuulia Tanttua mitataan hiilidioksidin nettovaihtoa Hangassuolla kesällä 2003 ja Micaela Morero ottaa kaasunäytteitä hiilidioksidi- ja metaanivaihtodon määrittystä varten talvella 2003.

siin soihin. Samaa pääryhmäluokittelua käytettiin tässä tutkimuksessa. Käytännössä kumpikin ryhmä sisältää suuren kirjon kosteudeltaan ja kasviyhdyskunniltaan erilaisia suotyyppisiä.

Perustuotantoa ja hajotusta seurattiin eri vuodenaikoina yleisesti käytössä olevan kammiomenetelmän avulla (Kuva 2). Lisäksi tutkimusaloilla mitattiin tärkeiksi tiedettyjä ympäristötekijöitä: lämpötilaa, yhteyttämissäteilyä, pohjavesitasoa sekä kasvillisuuden määrää ja laatua. Ympäristötekijöiden ja kaasujenvaihton välille muodostettujen epälineaaristen regressiomallien ja ympäristötekijöiden aikasarjojen avulla rekonstruoidtiin molemmille kohteille tutkimusvuosien 2002–2004 hiilikaasuvuot. Samojen kohteiden viime vuosikymmenten ja -satojen aikainen hiilenkertymän selvittämiseen käytettiin alueelta kairattujen turvenäytteiden kuiva-ainetiheys-, hiilipitoisuus- ja ikämäärittäjiä (^{13}C - ja ^{14}C -ajoitukset).

Soiden hiilikaasuvirrat ovat dynaamisia

Perustuotanto ja hajotus seuraavat vuotuista ja vuorokaudenaikaista valo-, lämpö- ja kosteusvaihtelua. Myös kasvillisuuden määrä- ja laatuerot eri suotyyppien ja samankin suon eri pinnanmuotojen välillä vaikuttavat merkittävästi hiilidioksidin ja metaanivirtoihin. Vuotuisista sääoloista riippuen suot voivat olla joko hiilidioksidin nettomenettäjiä (–) tai nettositojia (+). Luonnontilaisten ombrotrofisten soiden hiilidioksiditaseen on havaittu vaihtelevan boreaalisella vyöhykkeellä $-85 - +67 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Vastaavasti minerotrofisilla soilla vuositasearviot ovat $-101 - +98 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Joinakin vuosina luonnontilaisten soilla hajotus siis on suurempaa kuin hiilensidonta ja soiden hiilivarasto pienenee. Negatiivinen vuositase syntyy,

kun pohjavesitaso laskee kasvukauden aikana tavanomaista syvemmälle. Jo muutaman viikon kuivuusjakso riittää nopeuttamaan hapellista hajotusta paljastuneessa kerroksessa niin paljon, että vuositaseesta muodostuu negatiivinen. Pitkällä aikavälillä merkkiä vuosia on kuitenkin ollut enemmän, koska turvetta on kertynyt.

Märissä ja siten myös hapettomissa turvekerroksissa hapettomien hajotusketjujen lopputuotteena syntyy metaania. Vuotuiset metaanipäästöt ovat suurimpia märillä, runsaasti putkilokasveja kasvavilla soilla. Erot metaanipäästöjen suuruudessa ovat valtavia suotyyppien ja jopa saman suon eri pinnanmuotojen välillä. Havaintojen mukaan ombrotrofisten soiden metaanipäästö on alle $1-16 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ja minerotrofisten soiden vastaa- vasti alle $1-42 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Märkinä ja lämpiminä vuosina paikallinen metaanipäästö voi olla jopa kaksinkertainen viileän ja kuivan vuoden päästöön verrattuna. Koska metaanipäästöä koskevia tutkimuksia oli tehty monilla suotyypeillä sääoloiltaan erilaisina vuosina, ne todennäköisesti kuvastavat hyvin sitä vaihtelua, mitä boreaalisten soiden metaanipäästöissä todellisuudessa esiintyy.

Mittauksista malleiksi ja ennusteiksi

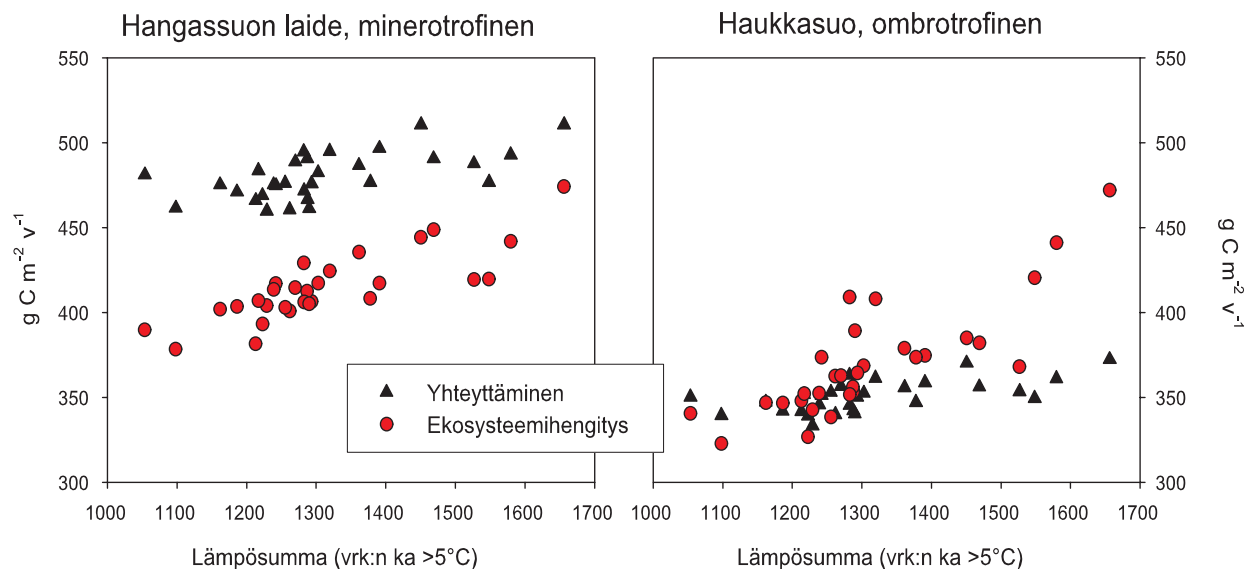
Mitattujen hiilikaasuvuotien ja ympäristömuuttujien välille rakennettiin regressiomallit, jotta voitaisiin tarkastella vuotuista hiilidioksidin ja metaanitaseen vaihtelua samoilla kohteilla kolmen vuoden mittausjaksoa pidemmällä aikavälillä. Tutkimuskohteille simuloitiin alueelle tyypillistä säää kolmenkymmenen vuoden jaksolle Finnfor-mallin sääsimulaattoria käyttäen. Säämuuttujista (lämpötila, sadanta) mallinnettiin edelleen lämpö- ja kosteusolosuhteet tutkimuskohteille tarkasteltavana

olevalle jaksolle. Kasvillisuuden vuotuisen kehityksen ennustamiseen kehitykseen käytettiin maastohavaintojen pohjalta rakennettuja malleja. Näitä aikasarjoja käytettiin regressiomallien syöttötietoina, ja näin saatiin rakennettua tunneittainen hiilikaasujenvaihto molemmille tutkimuskohteille 30 vuoden jaksolle.

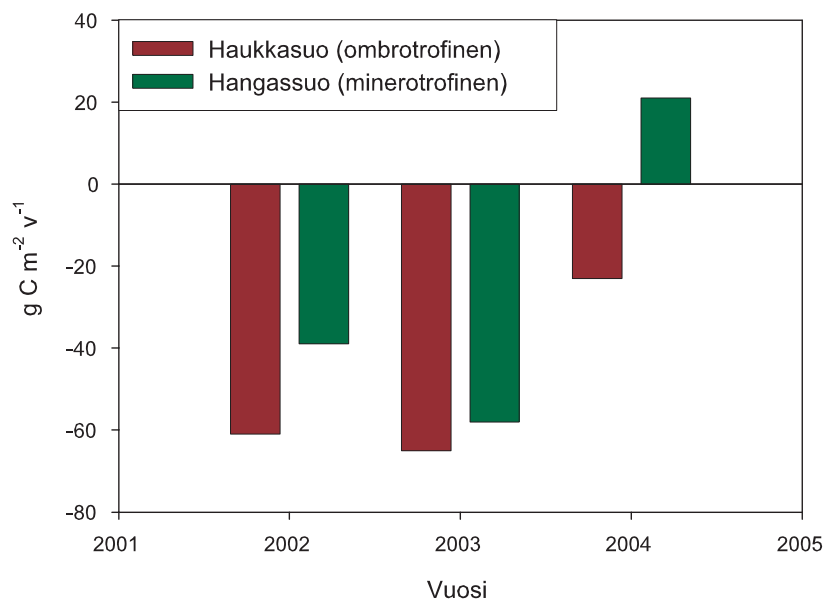
Regressiomallit olivat aineiston kattavuudeltaan hyviä. Kehittämistarpeita ilmeni erityisesti tutkimusoiden todenmukaisten lämpötila- ja pohjavesitaso-olosuhteiden mallintamisessa. Mallit kuitenkin kertovat yhden suon toiminnasta samansuuntaisia tuloksia kuin mitä voidaan päätellä aiemmista yksittäisten vuosien maastohavainnoista eri koh-

teilta. Niin kauan kuin sääolojen muutos ei johda kasvillisuusmuutokseen, vuosien välinen vaihtelu yhteyttämisnopeudessa on pienempää kuin hajotusnopeudessa (Kuva 3).

Kuivuus ja lämpö suosivat hapekasta hajotusta, jolloin hiilidioksidia voi vapautua ilmakehään enemmän kuin sitä suolle sitoutuu. Vaikka turpeen hapekkuuden lisääntyminen samalla pienentää metaanina ilmakehään poistuvan hiilen määrää, suon hiilivaranto pienenee tällaisina vuosina. Tutkimusvuosille laskettujen hiilikaasutaseiden perusteella molemmat suot menettivät hiiltä sekä 2002 että poikkeuksellisen kuivana vuonna 2003 (Kuva 4).



Kuva 3. Hangas- ja Haukkasuon simuloidut hiilidioksidivaihdot olivat sitä suurempia mitä suurempi oli vuotuinen lämpösukka. Lämpösukka perustuu vuorokauden keskilämpötilaan ja siinä lasketaan yhteen ne lämpöasteet, jotka ylittävät 5 °C. Simuloitujen vuosien sääolojen vaihtelu vastasi vuosien 1961–1990 vaihtelua Anjalankoskella.



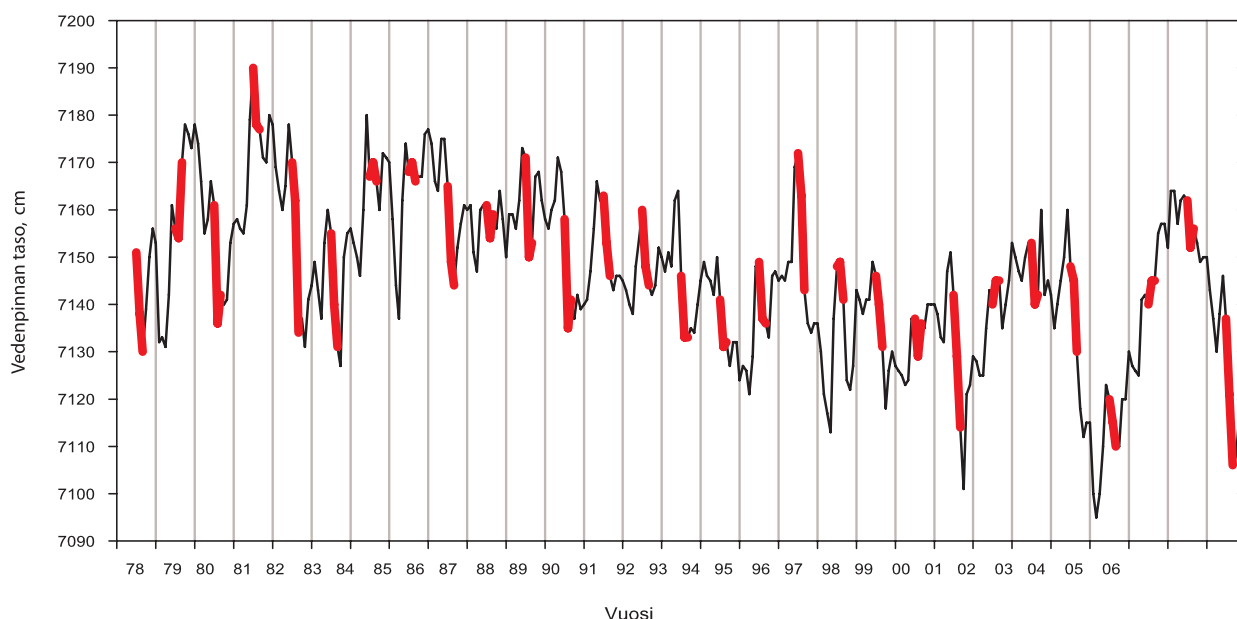
Kuva 4. Anjalankosken Haukka- ja Hangassuon hiilikaasutaseet tutkimusvuosina 2002–2004. Haukkasuon tutkimuskohde oli ombrotrofinen keidasrämie ja Hangassuon minerotrofinen nevalaie.

Märimpänä vuotena 2004 Hangassuon minerotrofinen laide olisi toiminut hiilen nieluna, mutta ombrotrofinen Haukkasuo olisi edelleen menettänyt vähän enemmän hiiltä kuin mitä sinne sitoutui. Koska tämän vuosikymmenen kuudesta vuodesta kolmena turpeen vedenpinta on ollut kasvukaudella keskimääräistä alempana, on aihetta epäillä, että tutkimuskohteiden turvevarat eivät ole kasvaneet tällä vuosituhanella lainkaan (Kuva 5).

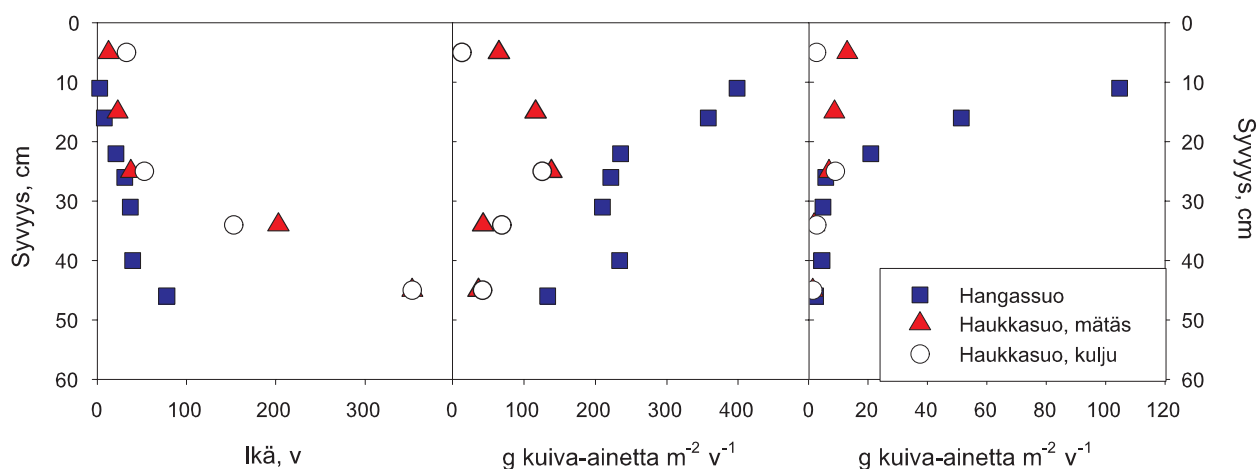
Viimeaikainen hiilen kertymä

Turpeen pintakerroksista otettujen näytteiden iän, kuiva-ainetiheyden ja hiilipitoisuuden avulla saa-

daan selville lähinnä vähän hajonneen karikkeen ja sen sisältämän hiilen kerrostumisnopeus. Saranevalai-teella kariketta näytti muodostuvan huomattavasti enemmän kuin keidasrämeellä, mutta hajotuksen seurauksena siitä näytti jäävän jäljelle ajan myötä yhtä vähän kuin keidasrämeen karikkeesta (Kuva 6). Suon pintaosissa muutamia vuosia vanhasta kasvimassasta on vielä suuri osa hajoamatta, mutta muutamien kymmenien senttimetrien syvyydessä jo kymmeniä tai satoja vuosia maatuneesta aineksesta on jäljellä vain murto-osa. Vasta syvemmillä, pysyvästi hapettomaan kerrokseen vesitason alapuolelle kertyvä turve ja sen sisältämä hiili kuvastavat suohon kertyviä hii-



Kuva 5. Turpeen vedenpinnan korkeus verrattuna meren pinnan tasoon tutkittuja soita lähimmällä Suomen ympäristökeskuksen virallisella mittauskohteella (Valkeala 60°55'N, 27°02'E). Hiilen sitoutumisen kannalta kriittisimmän ajankohdan eli kesä-elokuun arvot on merkitty aikasarjaan punaisella.



Kuva 6. Turpeen ikä, turpeen näennäiskertymä ja jäljellä oleva kuiva-aineen määrä näytteen ikään suhteutettuna eri syvyyksillä Hangas- ja Haukkasuon tutkimusalueita. Mättäät ovat keidasrämeen kuivia pintoja ja kuljut märkiä pintoja. Kuiva-aineesta noin 40–50 % on hiiltä.

livarantoja. Hajotustoiminta jatkuu kuitenkin hitaasti myös hapettomissa olosuhteissa. Hiilen kertymänopeus on siis suhteellista, ja tiettyä ajankohtana sidotun hiilen kertymänopeus pienenee ajan kuluessa, kun kuolleen kasviaineksen hajoaminen etenee. Turpeen pintaosissa nykyinen karikkeen kerrostumisnopeus on esimerkiksi Hangassuolla lähes $200 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ kun taas koko turvekerroksen paksuuteen ja eri kerrosten ikään perustuva näennäinen pitkän aikavälin keskimääräinen hiilenkertymä on Geologian Tutkimuskeskuksen (GTK) mittausten mukaan ollut sekä Hangan- että Haukkasuolla $22 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Koko Suomessa viimeisimmän jääkauden jälkeinen hiilen kertymänopeus on keskimäärin ollut minerotrofisilla soilla $17 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ja ombrotrofisilla soilla $21 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Vaikka hiilen pitkäaikaiset kertymänopeudet ovat tutkimuskohteillamme samansuuruiset, samojen ajanjaksojen hiilikertymäärvot ovat vaihdelleet hyvin paljon soiden kehitysvaiheesta, ilmastosta ja paikallisista tekijöistä johtuen. Se, kasvaako vai pieneneekö soiden hiilivaranto ja millaisiksi koko turvekerrokseen perustuvat pitkäaikaiset kertymänopeudet muotoutuvat tulevaisuudessa, riippuu sääolosuhteista, lähinnä kuivien jaksojen yleisyydestä kasvukauden aikana.

Tulevaisuuden näkymät

Soiden toiminta riippuu vallitsevista olosuhteista. Siten muutokset ilmakehässä ja maankäytössä

vaikuttavat suoraan myös suoekosysteemien toimintaan tulevaisuudessa. Esimerkiksi ihmistoiminnasta johtuva hiilidioksidipitoisuuden kasvu ilmakehässä lisää sekä suoekosysteemiin sitoutuvan että sieltä poistuvan hiilen määrää. Sääoloista riippuen suot ovat tulevaisuudessa siten entistä suurempia hiilinieluja tai entistä suurempia nettolähteitä, jos mikään muu kuin hiilidioksidipitoisuus ei muutu.

Suomen leveysasteille on kuitenkin ennustettu nykyistä lämpimämpää, erityisesti syksy- ja talvi-kuukausiksi, jolloin myös sateita on odotettavissa nykyistä enemmän. Viime vuosina tutuiksi tulleet kuivat jaksot kasvukauden aikana voivat johtaa hiilen vuotaiseen nettohävikkiin soilta. Lämpimät syksyt lisäävät edelleen hajotusta. Toisaalta lumipeitteen sulaminen aiemmin keväällä aikaistaa ainakin vihreinä talvehtivien kasvien hiilensidonnan alkamista.

Pidempiäaikaiset muutokset sääoloissa ja siten ekosysteemin olosuhteissa voivat aiheuttaa suuria muutoksia myös kasvi- ja eliöyhdyskunnissa. Pitkällä aikavälillä myös muiden tekijöiden, esimerkiksi ultraviolettisäteilyn lisääntymisen, alailmakehän otsonipitoisuuden kasvun tai ympäristömme kemikalisoitumisen samanaikaiset muutokset vaikeuttavat edelleen soiden perustuotannon, hajoituksen ja turpeen kertymänopeuden ennustamista.

3.1.4. Johtopäätökset

- Luonnontilaisten soiden pintaosiin kertyvästä kasvimassasta vain murto-osa varastoituu pitkällä aikavälillä turpeeksi. Viime vuosien yleinen kasvukaudenaikaisten kuivien jaksojen esiintyminen on vaikuttanut siten, että soidemme turpeen kertymänopeus on hidastunut. Kuivien jaksojen esiintyminen on erittäin merkittävä hiilen varastoitumista turpeeseen säätelevä tekijä.
- Tutkimuksen tulokset osoittavat, että soiden hiilidioksidi- että metaanivuot vaihtelevat suuresti sääoloista ja kasvillisuustyypeistä johtuen. Keskimääräisten vuositasoiden hajonta on siis luonnollisen vaihtelun takia suurta. Soiden luokittelu tarkemmin kuin vain kahteen pääryhmään, ombro- ja minerotrofisiin soihin, yhdessä lisätutkimusten kanssa, pienentäisi paikallisesta vaihtelusta johtuvaa hajontaa.
- Nykytietämys ei riitä antamaan kattavaa kokonaiskuvaa luonnontilaisten soiden nykyisestä hiilidioksiditaseen ajallisesta vaihtelusta erityyppisillä soilla. Metaanipäästöjä koskeva olemassa oleva tieto on luotettavampaa.
- Hiilitaseiden mallinnuksessa ilmenneiden ongelmien perusteella tulevaisuudessa on syytä 1) kehittää hiilen kierron eri prosesseihin pohjautuvia malleja tasapäistävien regressiomallien sijaan, 2) ottaa huomioon ympäröivien alueiden pohjavedenpinnan tason vaikutus soiden vesitasemalleissa, 3) kehittää kasvillisuuden vuotuisen vaihtelun mallintaminen sääoloista riippuvaksi ja 4) turvata pitkäaikaisten ja monipuolisten maastohavaintosarjojen kerääminen, jotta voidaan kehittää luotettavia malleja ennustamaan hiilikaasujenvaihtoa ja sitä kautta hiilen kertymää muuttuvissa olosuhteissa.

3.2. Kasvihuonekaasupäästöt metsäojitetuilta soilta ja niihin vaikuttavat ympäristötekijät

Kari Minkkinen, Jukka Laine,
Timo Penttilä

3.2.1. Tausta

Metsäojitus on n. 5 miljoonan hehtaarin pinta-alalla potentiaalisesti merkittävä kasvihuonekaasujen päästöihin välillisesti vaikuttava toimenpide Suomessa. Pääosin 1960–1980 luvuilla tehdyt ojitukset tuottavat lisäpuustoa jo yli 13 miljoonaa kuutiometriä vuodessa ja suuri osa puustoista alkaa olla harvennushakkuiden tarpeessa. Mutta miten ojitus ja metsätaloustoimenpiteet vaikuttavat suometsien kasvihuonekaasujen päästöihin ja hiilivirtoihin?



Sararäme luonnontilassa (vasen kuva) ja n. 40 vuotta ojituksen jälkeen. Kuivatuksen johdosta puuston kasvu on lisääntynyt selvästi. Samalla pintakasvillisuuslajisto on muuttunut huomattavasti; suokasvillisuus on korvautunut kangasmetsälle tyypillisellä kasvilajistolla (Kuva: Sakari Sarkkola).

Ojituksella alennetaan suon pohjavedenpintaa, lisätään turvemaan pintakerrosten hapellisuutta ja täten mahdollistetaan puuston kasvatus suolla. Hapellisuuden kasvu pintaturvekerroksessa kiihdyttää turpeen hajotustoimintaa, mikä johtaa hiilidioksidipäästöjen (CO_2) ja ravinteikkailla soilla mahdollisesti myös typpioksiduulipäästöjen (N_2O) lisääntymiseen. Hapettomissa oloissa hajotustuotteena syntyvän metaanin (CH_4) päästöt sen sijaan vähenevät ja usein loppuvat kokonaan, kun pintaturve hapettuu ja syväjuuriset suokasvit häviävät.

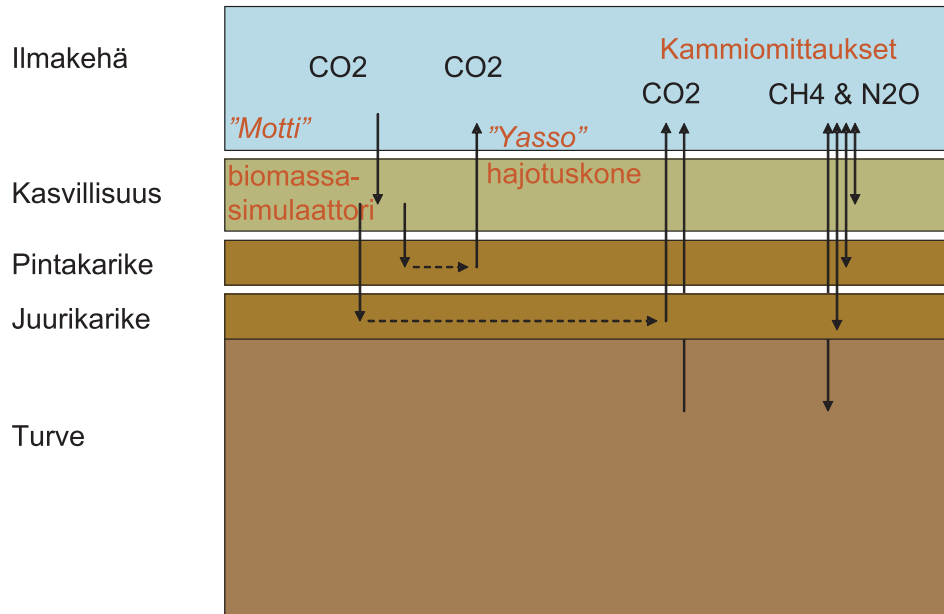
Biomassaan, lähinnä puustoon, sitoutunut hiilimäärä kasvaa ojituksen jälkeen hyvin voimakkaasti. Tästä huolimatta koko suon maanpäällinen kariketuotos (maan päälle tuleva hiilivirta) ei välttämättä kasva, kun biomassa pysyy sitoutuneena puuston maanpäällisiin osiin puuston hakkuuseen saakka. Sen sijaan muutokset maanalaisessa tuotoksessa (juurten kasvu ja kuoleminen) voivat olla suuriakin, mutta näitä asioita tunnetaan yhä huonosti. Karikkeen laatu muuttuu kuitenkin puupitoisemmaksi ja sen hajotettavuus heikkenee ojitusta edeltäneestä tilanteesta. Turpeen lämpötila ja pH laskevat puuston kasvaessa ja nämä molemmat tekijät hidastavat orgaanisen aineen hajotusnopeutta. Ojitusalueilla tehtävät hakkuut nostavat yleensä pohjavedenpintaa, kun taas uudistamiseen liittyvä maanmuokkaus esimerkiksi mätästämällä johtaa turvemättäiden hapettumiseen ja saattaa uudestaan kiihdyttää hajotustoimintaa. Toisaalta myös liiallinen kuivuus saattaa rajoittaa hajotustoimintaa kesäkuukausina.

Se, että muuttuuko suo ojituksen jälkeen hiilen lähteeksi, vai jatkuuko orgaanisen aineen kertyminen myös ojitetulla suolla, riippuu siis muutoksista hajotuksen ja tuotoksen suhteessa. Aiempien mitaustulosten valossa molemmat kehityslinjat ovat mahdollisia, ja niihin vaikuttavat ojitetun suon maantieteellinen sijainti ja ekohydrologinen tilanne ennen ojitusta.

3.2.2. Tutkimusmenetelmät ja tavoitteet

Kasvihuonekaasujen päämittausmenetelmiä on kaksi: 1) kammiomenetelmä, jolla voidaan mitata maan ja pintakasvillisuuden kaasunvaihtoa sekä 2) mikrometeorologinen kovarianssimenetelmä (Eddy-covariance), jolla voidaan mitata koko ekosysteemin kaasunvaihtoa (yleensä CO_2) latvuston yläpuolelta (ks. Laurila ym. 2007, tämä raportti). Metsäojitetun suon maaperän kaasuvirtoja on aiemmin mitattu muutamalla paikalla keskisessä

KHK-taselaskennan käsitelmä



Kuva 7. Kasvihuonekaasutaseiden laskennassa käytetty käsitelmä.

ja itäisessä Suomessa, kun taas koko suon CO₂-vaihtoa ei ole aiemmin mitattu missään. Tornimetelmällä saadaan koko mitattavan ekosysteemin CO₂-tase, mutta taseen jako komponentteihin (puusto, pintakasvillisuus, maa) ei ole mahdollista ilman lisämittauksia. Kammiomenetelmällä voidaan mitata maan eri komponenttien (turve, karie, juuret) ja pintakasvillisuuden osuutta kaasunvaihdossa. Tällöin puuston osuus täytyy mallittaa kasvu- ja karikesatomallien avulla.

Tässä tutkimushankkeessa käytettiin kammiomenetelmää maan kaasuvirtojen tutkimiseksi. Tarkemmin eriteltynä 1) selvitettiin hakkuiden vaikutusta maan kasvihuonekaasupäästöihin Etelä- ja Pohjois-Suomessa sijaitsevilla hakkuukokeilla, 2) mitattiin kasvihuonekaasuvirtoja erilaisilla ojitusalueilla erilaisissa ilmasto-oloissa ja 3) mallitettiin kaasuvirrat tilastollisesti mitattujen ympäristötekijöiden avulla. Tilastollisten mallien ja sääsimulointien avulla 4) ennustettiin turpeesta vapautuvien kasvihuonekaasujen määrää erilaisilla ojitusalueilla ja 5) arvioitiin Suomen ojitusalueilta vapautuvien kasvihuonekaasujen kokonaismäärää vuositasolla. Lisäksi arvioitiin maahan tulevia hiilivirtoja mallittamalla puuston tuotosta ja karikesaatoa Motti-mallilla (Hynynen ym. 2005) ja karikkeen hajotusta maan pintakerroksessa Yasso-mallilla (Liski ym. 2005). Suometisien kokonaishiilitaseita arvioitiin yhdistämällä tuotusmallien ja hajotusmallien tulokset (Kuva 7).

3.2.3. Tulokset

Hiilidioksidi (CO₂)

Ojitettujen soiden turpeen hiilidioksidipäästöjä mitattiin näytealoilta, joista oli poistettu maan yläpuolinen kasvillisuus ja karie, ja juuristo oli katkottu vuosi ennen mittausten aloittamista. Mitatut CO₂-päästöt ovat siten peräisin pelkästään turpeen orgaanisen aineen (sis. katkotun juuriston) hajoamisesta.

Lämpötila on merkittävin orgaanisen aineen hajoamiseen ja siten turvemaasta vapautuvan hiilidioksidin määrään vaikuttava tekijä ojitetuilla soilla. Noin 90 % CO₂-päästöjen ajallisesta vaihtelusta samalla paikalla selittyy maan lämpötilalla. Spatiaalinen vaihtelu on kuitenkin suurta. Lämpötilan lisäksi myös turpeen orgaanisen aineen koostumus ja mikrobipopulaatiot vaikuttavat päästöihin, mutta toistaiseksi näitä on ollut vaikea mallittaa. Toisin kuin luonnontilaisilla soilla, ojitetuilla soilla vedenpinta on yleensä niin syvällä, ettei sen muutoksilla ole yleensä kovin suurta vaikutusta CO₂-päästöihin, koska suurin osa orgaanisen aineen hajoamisesta vapautuvasta CO₂:sta on peräisin uudesta karikkeesta ja turpeen pintakerroksista.

Uusien tutkittujen ojitettujen soiden koealojen välillä oli merkittäviä eroja CO₂-päästöissä. Päästöt kasvoivat selvästi karuilta tyypeiltä ravinteik-

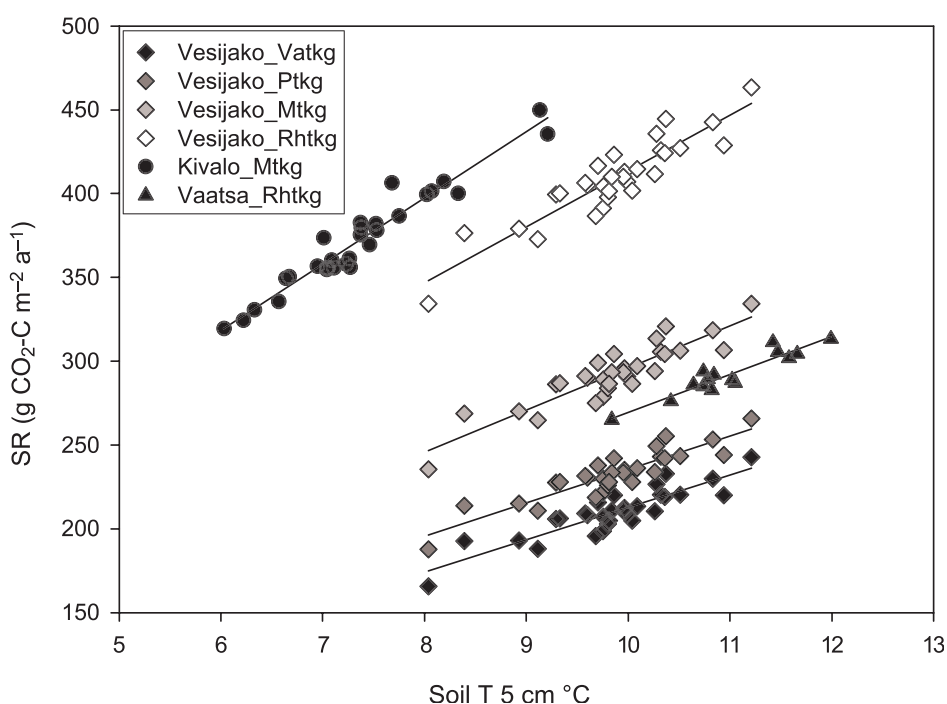
kaille, mikä oli odotettua. Odottamaton tulos saatiin verrattaessa eteläisiä ja pohjoisia kohteita: päästöt samoilla suotyypeillä olivat suurimpia pohjoisessa, vaikka lämpötilat olivat alhaisempia kuin etelässä. Koska CO₂-päästö riippuu voimakkaasti lämpötilasta, testattiin erilaisten vuosien vaikutusta simuloimalla päästöjä 30 vuoden sääaineistoilla kyseisille mittausalueille. Vuositasolla eteläiset mustikkaturvekangastyypin kohteet tuottivat n. 350 g m⁻² hiilipäästöt orgaanisen aineen hajotuksesta, kun pohjoisessa päästö oli yli 470 g m⁻² (Kuva 8). Yksi merkittävä ero muodostui talvikauden päästöistä, jotka olivat etelässä selvästi pienemmät kuin pohjoisessa, jossa lumikerros mahdollistaa hajotustoiminnan jatkumisen myös maan pintaosissa lähes koko talven ajan. Maan ravinteisuudesta tai turpeen vedenpintojen eroista ei löytynyt selkeitä selittäjiä näille eroille. Aineisto on kuitenkin liian pieni, jotta voisimme arvioida ovatko havaitut erot yleistettävissä muillekin ojitetuille soille, vai onko kyse vain tutkittujen soiden ominaisuuksista. Saatua tuloksia testataan ja niiden yleistettävyyttä pyritään parantamaan uudessa MMM:n rahoittamassa projektissa ("Metsäojitettujen soiden hiilitaseiden seurantarjestelmä – ennustaminen ja monitorointi muuttuvissa olosuhteissa, 2006–2008"), jossa CO₂-mittauksia tehdään n. 70 kohteella eri puolella Suomea.

Kyseiset maahengitysmittaukset antavat arvion vain maasta vapautuvasta hiilidioksidista. Metsäojitettujen soiden hiilidioksiditaseita arvioitiin yhdistämällä maahengitysmittaukset mallitettuihin hiilen sidontalukuihin. Mallilaskelmien

mukaan maasta vapautuvan hiilidioksidin määrä ylitti useimmiten maahan tulevan hiilen määrän, eli maan hiilidioksiditase oli negatiivinen. Ojitettujen soiden maaperä oli siis hiilen lähde ilmakehään.

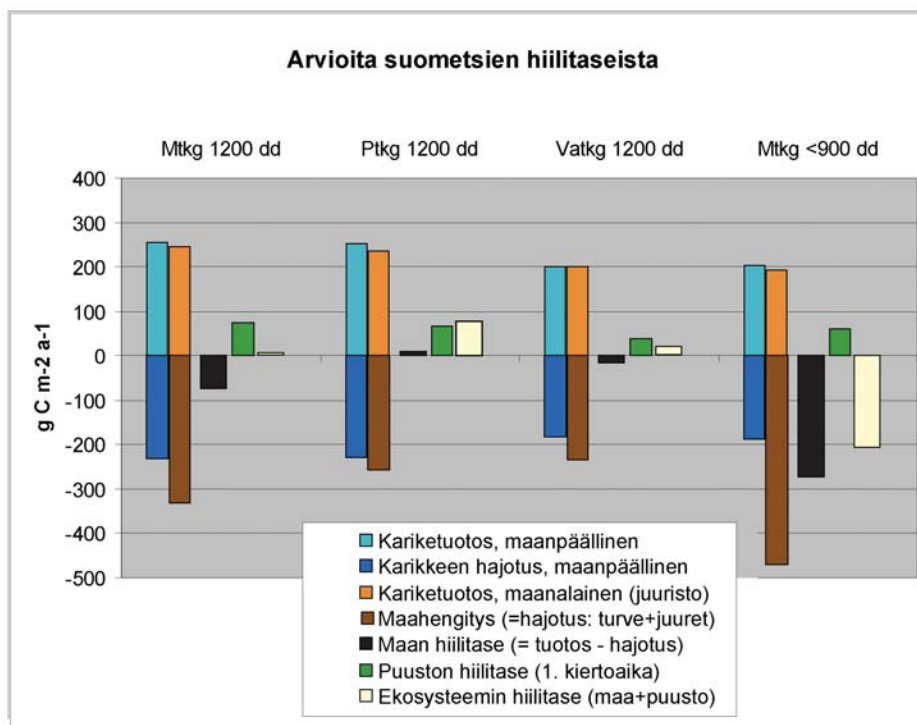
Olemme aiempien tutkimusten perusteella esittäneet että ojitettujen soiden maan hiilitaseet olisivat keskimäärin positiivisia (ojitettu suo on hiilen nielu). Positiiviset taseet havaittiin karuilla soilla ja negatiiviset ravinteikkailla soilla. Nyt saaduissa maanhengitystuloksissa on sama trendi, mallitetu hiilen sidonta kompensoi mitatun hajotuksen kokonaan tai lähes kokonaan karummilla tyypeillä, mutta rehevämmillä tyypeillä ja erityisesti Pohjois-Suomessa maan hiilitase jäi selvästi negatiiviseksi (Kuva 9). Kun puuston pitkällä aikavälillä (1. kiertoaika) sitoma hiili laskettiin mukaan (sisältää arvion myös hakkuissa poistuvasta hiilestä), oli koko ekosysteemin hiilitase kuitenkin useimmiten positiivinen (Kuva 9).

Tutkimusohjelmassa mitattiin ensimmäistä kertaa myös suoraa hiilidioksidin tasetta tornimenetelmällä kahdella puustoisella paikalla Etelä-Suomessa; metsitetyllä suopellolla ja karuhkolla metsäojitetulla suolla. Metsitetty suopello oli hiilen lähde ja metsäojitettu suo hiilen nielu! Kun puustoon mittausjakson aikana sitoutunut hiilimäärä vähennetään koko hiilen nettovaihdosta, poistui suopellon maaperästä (ja pintakasvillisuudesta) n. 250 g C m⁻² a⁻¹, kun taas metsäojitetulla suolla maahan sitoutui yli 100 g C m⁻² a⁻¹. Nämä tulokset tukevat aiempia tuloksia siitä, että hiilidynamiikan vaihtelu erilaisten ojitettujen soiden välillä on suur-



Kuva 8. Simuloidut turve-
maan hajotuksesta peräi-
sin olevat CO₂-päästöt eri
mittauskohteissa maan
lämpötilan suhteen. Simu-
loinnissa päästöä selittäviä
regressiomalleja ajettiin 30
vuoden tunneittaisella sää-
datalla. Kuvassa jokainen
piste merkitsee yhden vuo-
den kokonaispäästöjä.

Kuva 9. Esimerkkilaskelma ojitettujen soiden hiilivirroista eri suotyypeillä (Vatkg–Mtkg) Etelä-Suomessa (1200 dd) ja Pohjois-Suomessa (<900 dd). Negatiiviset luvut tarkoittavat hiilen päästöä, positiiviset sidontaa.



ta, ja että ojitetut suot voivat toimia merkittävinäkin hiilen nieluina.

Sekä mallituksessa ja mittauksissa on luonnollisesti lukuisia virhemahdollisuuksia. Tuotosmallit perustuvat esim. maanalaisen tuotoksen osalta hyvin vähäiseen tietoon, hajotus-malleja ei ole vielä pystytty kalibroimaan turvemaiden olosuhteisiin. Mittauksissa voi olla systemaattisia virheitä liittyen mm. näytealojen käsittelyyn (juurten katkenta, kasvien poisto). Näiden virhelähteiden vaikutuksia pyritään arvioimaan jatkotutkimuksissa.

Suomen ensimmäisessä kasvihuonekaasuraportoinnissa käytettiin mallitusmenetelmän tuloksia, joiden mukaan laskettuna Suomen metsäojitettujen soiden hiilitase oli kokonaisuutena negatiivinen. Havaitun suuren vaihtelun ja eri tutkimusmetodeilla saatujen osittain ristiriitaisten tulosten vuoksi emme kuitenkaan pysty vielä arvioimaan tämän mallilaskelman luotettavuutta. Arviot parantunevat uuden alueellisesti selvästi edustavamman tutkimusaineiston myötä lähitulevaisuudessa.

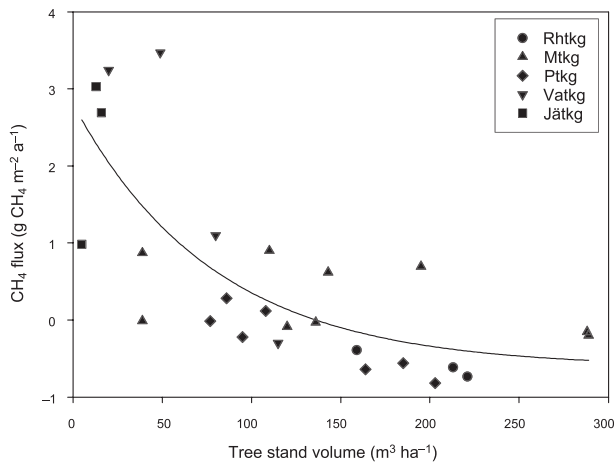
Metaani (CH₄)

Metaanin osalta tilanne on huomattavasti yksinkertaisempi kuin hiilidioksidin. CH₄-päästöt vähenvät ojituksesta kuluvaan ajan myötä kuin kuivumis- ja kasvillisuussuksessio etenee. Kuivumissuksessioon nopeus riippuu muutoksista suon ekohydrologiassa: alunperin ravinteiset ja märät suotyyppit muuttuvat kasvillisuudeltaan nopeasti, karut tyyppit hitaammin. Muutosnopeus liittyy kiin-

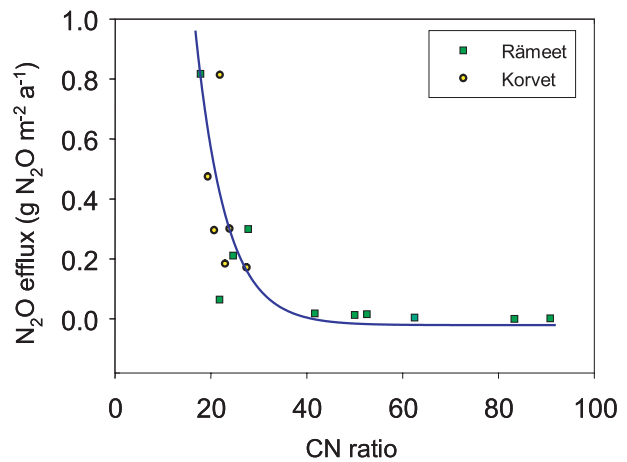
teästi myös puuston kehittymiseen ja metaanipäästöt korreloivat negatiivisesti puuston määrän kanssa – puuston kasvaessa metaanipäästöt siis pienenevät. CH₄-päästöjä onkin mahdollista mallittaa puuston määrän avulla. Suomen ojitetuilta soilta kerätyn aineiston mukaan CH₄-päästöt loppuvat yleensä, kun puuston määrä ylittää 140 m³ hehtaarilla (Kuva 10). Karuilla ojitusalueilla näin ei käy koskaan, mutta rehevämät suot alkavat sitoa metaania jo 20–30 v. ojituksen jälkeen. Koska ojitetut suot ovat yhä melko nuoria, ja joukossa on runsaasti karuja tyyppisiä, Suomen metsäojitettujen suot ovat yhä pieni CH₄-lähde (0,048 Tg CH₄ vuodessa), vaikka luonnontilaan verrattuna päästöt ovatkin pienentyneet huomattavasti.

Typpioksiduuli (N₂O)

Typpioksiduulin muodostuminen on mahdollista olosuhteissa, jossa nitrifikaatio ja denitrifikaatio-prosessit toimivat. Luonnontilaisissa soissa nitrifikaatio estyy hapettomuuden vuoksi, ojitetuilla soilla alhainen pH rajoittaa tätä prosessia. Runsaaravinteisillä, tai esim. lannoitetuilla ojitetuilla soilla typpioksiduulin muodostuminen on kuitenkin mahdollista ja suuriakin hetkellisiä päästöjä on havaittu mm. maan jäätymisen yhteydessä. Päästöjen mallittaminen prosessitasolla ei vielä onnistu, mutta vahva tilastollinen yhteys on havaittu maan hiilityypisuhteen (CN) ja vuositason päästön kanssa: runsas typen määrä suhteessa hiileen, eli alhainen CN-suhde nostaa N₂O-päästöjä. Suhde on epälineaarinen ja merkittävä muutos tapahtuu kun hiilityypisuhte pienenee 40:stä 20:een (Kuva



Kuva 10. Ojitettujen soiden metaanipäästöt puuston määrän funktiona.



Kuva 11. Typpioksiduulipäästöt metsäojitetuilta soilta hiilipitoisuuden funktiona.

11). Korprien ojitusalueilla CN-suhteet ovat selvästi pienempiä kuin rämeillä mikä näkyy myös niiden keskimääräistä suurempina päästöinä. Käytimme ko. regressiomallia ja metsäojitusalueiden CN-ja-kaumia sekä suotyyppikohtaisia CN-suhteita ennustamaan N_2O -päästöjä Suomen metsäojitetuista soista. Lähestymistavasta riippuen tämänhetkinen päästöennuste on rajoissa $0,010\text{--}0,015\text{ Tg } N_2O\text{ a}^{-1}$.

Hakkuiden vaikutukset päästöihin

Hakkuu nosti pohjavedenpintaa ja maan pintalämpötilaa jonkin verran. Kokonaisuudessaan maan

CO_2 -päästöt laskivat 35–45 %, eli juuristohengityksen verran, mutta vanhan turpeen hajoamisesta vapautuvan CO_2 :n määrä ei muuttunut. Maan kokonaishiilitaseeseen hakkuilla ei siis ollut merkitystä. Pohjaveden nousu hakkuualalla aiheutti hienoisen pienenemisen CH_4 :n sitoutumisnopeudessa. N_2O -päästöt nousivat hakkuutähdekasojen kohdilla. Hakkuutähteistä vapautuu ilmeisesti typeä enemmän kuin vähäinen kasvillisuus ehtii sitä käyttää, mikä johtaa nitrifikaatioon ja tässä prosessissa välituotteena syntyvän N_2O :n vapautumiseen. Kokonaisuutena hakkuun vaikutukset kasvihuonekaasujen virtoihin olivat kuitenkin vähäisiä.

3.2.4. Johtopäätökset

- Tutkimushankkeen tulokset osoittivat, että metsäojitettujen soiden hiilidioksiditaseet vaihtelevat voimakkaasti ja suo voi olla joko hiilen lähde tai nielu kasvupaikkatypistä ja ilmastollisista oloista riippuen. Hiilitaseita voidaan arvioida jo nyt käytössä olevilla malleilla, mutta saatujen keskimääräisten arvojen luotettavuutta ei kuitenkaan ole mahdollista vielä arvioida monien päästöjen dynamiikkaan vaikuttavien tekijöiden vuoksi.
- Tulosten perusteella kuivatus vähentää soiden metaanipäästöjä voimakkaasti, jos kuivumissukessio on riittävä aiheuttamaan myös selvän kasvillisuusmuutoksen ja puuston kasvun. Koska Suomessa on ojitettu runsaasti metsänkasvatukselle liian karuja soita, vapauttavat ojitetut suot niiltä osin yhä metaania ilmakehään.
- Hankkeessa tehtyjen uusien laskelmien mukaan metsäojitus lisää typpioksiduulipäästöjä ravinteisilla paikoilla enemmän kuin aiemmin on arvioitu. Varsinkin korprien ojitusalueet ovat merkittäviä typpioksiduulin lähteitä.

3.3. Viljeltyjen ja viljelemättömien turvepeltojen

kasvihuonekaasupäästöt

Marja Maljanen, Jyrki Hytönen, Päivi Mäkiranta, Jukka Alm, Kari Minkkinen, Jukka Laine, Pertti Martikainen

3.3.1. Tausta ja tavoitteet

Suomen suopinta-alasta n. 0,7 miljoonaa ha on kuivatettu maatalouskäyttöön. Puolet maatalouskäyttöön otetusta turvemaan-alasta on hylätty tai metsitetty, mutta noin 300 000 ha turvemaista on kuitenkin yhä viljelykäytössä (Myllys ja Sinkkonen 2004). Maatalouskäytössä turvemaan ominaisuudet muuttuvat mm. vedenpinnan alenemisen, toistuvan muokkauksen, lannoituksen, kalkituksen ja mahdollisen kivennäismaan lisäyksen johdosta. Nämä tekijä vaikuttavat myös kasvihuonekaasujen, kuten hiilidioksidin (CO_2), metaanin (CH_4) ja typpioksiduulin (N_2O) muodostumiseen ja virtoihin. Ojitettu turvepelto on aina hiilidioksidin ja typpioksiduulin nettopäästäjä, mutta se saattaa olla heikko metaanin nielu.

Kasvihuonekaasuista typpioksiduulilla on 296-kertainen ja metaanilla 23-kertainen lämmitysvaiku-

tus hiilidioksidiin verrattuna 100 vuoden tarkastelujaksolla (IPCC 2001). Maatalousmaat tuottavat suurimman osan maasta peräisin olevasta N_2O :sta. Luonnontilainen suo ei juuri tuota N_2O :a, mutta ojitus lisää turvemaan N_2O -päästöä ja siksi orgaaniset turvepellot ovat merkittäviä N_2O :n lähteitä. Jopa 25 % (vuosittain 4 Tg) Suomen N_2O -päästöistä voi olla peräisin orgaanisista maatalousmaista (Kasimir-Klemedtsson ym. 1997), vaikka niiden pinta-ala on vain 13,6 % Suomen kaikista maatalousmaista (Myllys ja Sinkkonen 2004). N_2O :a muodostuu maassa pääasiassa mikrobiologisissa prosesseissa, nitrifikaatiossa ja denitrifikaatiossa, joihin vaikuttavat ympäristötekijät kuten lämpötila, kosteus, pH, kasvillisuus. Viljelystoimenpiteet, kuten muokkaus, lannoitus, kastelu ja maan tiivistyminen koneiden alla myös voivat vaikuttaa N_2O :n muodostumiseen. Pohjoisella alueella erityishuomio pitäisi kiinnittää N_2O :n talvipäästöihin jotka voivat olla jopa yli puolet vuosipäästöistä.

Metaanin lähteitä maataloudessa ovat mm. märehitijät ja lannan käsittely sekä vesikyllästetyt maat, kuten riisipellot. Hyvin ojitetut maatalousmaat ovat yleensä CH_4 -nieluja sitä hapettavien bakteerien toiminnasta johtuen. Maan vedenpinnan tason lisäksi lämpötila, typpilannoitus, kalkitus, maan muokkaus ym. toimenpiteet voivat vaikuttaa CH_4 -virtoihin.



Kesäinen ohraviljelmä eteläsuomalaisella suopellolla (kuva: Sakari Sarkkola).

Taulukko 1. Koealueet: Viljellyt pellot: 1. Jokioinen (Regina ym. 2004, Regina ym. 2004, Regina ym. 2006), 2. Liperi (Maljanen ym. 2001, 2003a, b), 3. Ilomantsi (Nykänen ym. 1995), 4. Rovaniemi (Regina ym. 2004, Regina ym. 2006), 5a. Kannus, (kaksi turpeenpaksuutta) (Maljanen ym. 2004) ja Peltoteitot: 5b. (5 aluetta).

Alue	C/N (g cm ⁻³)	Tilavuuspaino	pH (H ₂ O)	Turve (m)	Ojitus (v. sitten)
1.	21	0,49–0,51	5,8	nd	100
2.	16	0,33	6,0	0,2	40
3.	19	nd	5,3	1,4	60
4.	18	0,24–0,29	5,6	nd	50
5a.	31–32	0,32–0,50	4,8	0,3–0,7	nd
5b.	16–19	0,33–0,47	4,3–5,9	0,2– >1,0	50–100

nd = ei määritetty

Viljelytoimenpiteiden loputtua käynnistyy kasvillisuuden sekundaarinen sukkessio. Heinät ja ruohot dominoivat kasvillisuutta 15 vuoden ajan, ja avoimiin ojiin ilmestyy ensimmäisenä puut, kuten koivu ja paju. Ojien asteittainen umpeutuminen johtaa vedenpinnan nousuun, joka voi lisätä CH₄-päästöjä. Toisaalta viljelytoimenpiteiden loppuminen voi vähentää turpeen hajoamista ja siten myös CO₂- ja N₂O-päästöjä. Orgaanisten viljelykäytössä olevien maatalousmaiden kasvihuone-kaasupäästöjä on mitattu Suomessa viidellä koealueella. Seuraavassa tehdään yhteenveto aiemmista tuloksista sekä raportoidaan vuosittaiset kasvihuonekaasupäästöt viideltä peltoteitolta. Lopuksi tehdään johtopäätökset siitä, kuinka turvepeltojen kaasuvirrat muuttuvat viljelykäytön päättymisen jälkeen.

3.3.2. Aineisto ja menetelmät

KHK-virrat viljellyillä turvepelloilla

N₂O- ja CH₄-vuosipäästöjä on mitattu viidellä koealueella vuosina 1991–2002. N₂O- ja CH₄-virtoja mitattiin kammiomenetelmällä, CO₂-taseita mitattiin kahdella koealueella kammiomenetelmällä sekä kahdella alueella mikrometeorologisin menetelmin (EC-menetelmä). Mittaukset tehtiin ohra- tai nurmipelloilla sekä kasvittomilla aloilla (Taulukko 1).

KHK-virrat viljelemättömillä pelloilla

N₂O- ja CH₄- virtoja mitattiin vuosina 2002–2005 viidellä turvemaalla sijaitsevalla peltoteitolla Kannuksessa (Taulukko 1). Koealueilla oli yhteensä 30 kaasunmittauspistettä. Nämä turvemaat olivat olleet viljelykäytössä useita vuosikymmeniä, kunnes ne jäivät peltoteitoiksi (ilman kyntöä tai lannoitusta) 20–30 vuotta sitten.

CO₂-vaihtoa maaperän ja ilmakehän välillä mitattiin kammiomenetelmällä vuosina 2002–2004. Tässä esitetään alustavia tuloksia vuoden 2003 mittauksista. Ekosysteemin CO₂-nettovaihtoa (NEE) mitattiin läpinäkyvällä termotoidulla kammiolla (60 x 60 cm, h 30 cm), joka sijoitettiin maahan asennetun alumiinikauluksen päälle mittauksen ajaksi. Kauluksen yläosassa oli ura, joka mittauksen ajaksi täytettiin vedellä kaasutiiviiden takamiseksi. CO₂-pitoisuuden muutosta seurattiin CO₂-analysointorilla (EGM-4 Environmental Gas Monitor for CO₂, PP Systems, UK) 180 sekunnin ajan. Samanaikaisesti mitattiin auringon säteilyä (PAR) sekä ilman lämpötilaa (Ta) kammion sisällä. Mittaukset tehtiin täydessä valossa sekä osittain pimennetyissä olosuhteissa. Valomittauksen jälkeen mitattiin täysin pimennetyllä kammiolla kokonaisrespiraatiota (RTOT) samalla tavalla.

NEE ja RTOT laskettiin CO₂-pitoisuuden lineaarisesta noususta tai laskusta kammiassa. CO₂-virta ilmakehästä maahan on tässä positiivinen ja virta maasta ilmakehään negatiivinen. NEE voi olla negatiivinen tai positiivinen, kun RTOT on aina negatiivinen. Bruttofotosynteesille (PG) saatiin estimaatti seuraavalla kaavalla: NEE = PG – RTOT (1).

Vuorokautisen NEE:n laskemiseen laskettiin ensin arvot PG:lle ja RTOT:lle joka tunnille. Jokaiselle koealueelle laadittiin malli tilastollisin menetelmin ennustamaan PG:a ja RTOT:ta (esim Alm ym. 1997). Mallissa oli mukana bruttofotosynteesi, fotosynteesistä aktiivien säteilylehtialaindeksi, maan lämpötila 5 cm syvyydessä ja maan vedenpinnan taso.

Vuorokautiset bruttofotosynteesin ja respiraation arvot laskettiin käyttäen em. mallia ja jatkuvaa aikasarjaa ympäristömuuttujista. Netto CO₂-päästö kasvukaudelle laskettiin summaamalla lasketut tunnitteiset NEE arvot. Kasvukauden ulkopuolella

Taulukko 2. Mitattuja kasvihuonekaasujen vuosipäästöjä orgaanisilta viljelymailta Suomesta. Negatiiviset arvot tarkoittavat kaasun kulutusta maassa. CO₂-C-, CH₄-C- ja N₂O-N-päästöt yksiköissä g m⁻².

Kasvi	Alue	CO ₂ -C	CH ₄ -C	N ₂ O-N	Viite
Ohra	1.	210	-0,01– -0,04	0,62–2,41	Lohila ym. 2004, Regina ym. 2004, 2006
Ohra	2.	400	-0,37– -0,01	0,83–0,84	Maljanen ym. 2001, 2003a, 2003b
Ohra	4.	nd	-0,02–0,38	0,73–1,88	Regina ym. 2004, Regina 2006
Ohra	5a.	830	-0,13– -0,06	0,54–1,13	Maljanen ym. 2004
Nurmi	1.	80	-0,05– -0,01	0,50–0,99	Lohila ym. 2004, Regina ym. 2004, 2006
Nurmi	2.	750	-0,08	1,10	Maljanen ym. 2001, 2003a, 2003b
Nurmi	3.	nd	0,10–0,20	0,78–0,93	Nykänen ym. 1995
Nurmi	4.	nd	0,27–0,68	0,26–0,53	Regina ym. 2004, 2006
Nurmi	5a.	330–460	-0,07– -0,18	0,17–0,38	Maljanen ym. 2004
Kasvion	1.	nd	-0,03– -0,01	1,34–3,70	Regina ym. 2004
Kasvion	2.	880–1100	-0,26– -0,13	0,65–0,71	Maljanen ym. 2001, 2003a, 2003b
Kasvion	4.	nd	0,04–3,00	0,38–0,50	Regina ym. 2004, 2006
Kasvion	5a	690–790	-0,14– -0,01	0,40–3,70	Maljanen ym. 2004

nd = ei määritetty

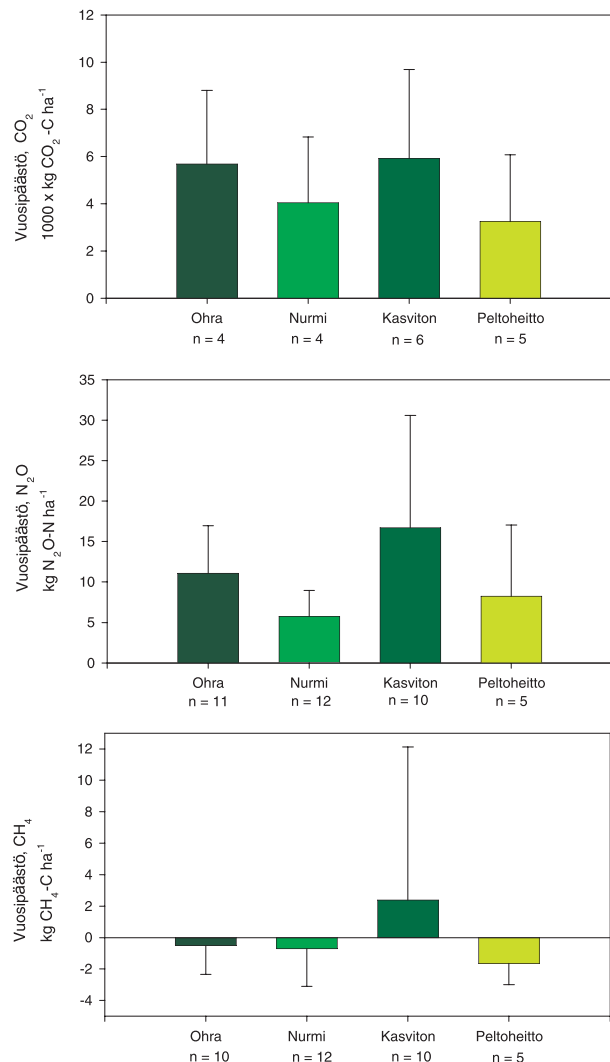
CO₂-virta määritettiin samoin kuin N₂O- ja CH₄-virta (katso seuraava kappale).

N₂O- ja CH₄-virtoja mitattiin viljelemättömiltä pelloilta kolmen vuoden ajan. Tässä raportoidaan tulokset vuosilta 2003 ja 2004. Lumettomana aikana CH₄- ja N₂O-virtoja mitattiin joka toinen viikko staattisenkammion menetelmällä. Kaasujen pitoisuuden määritettiin vuorokauden kuluessa näytteenotosta kaasukromatografilla. Talvella lumipeitteen aikaan kaasuvirrat määritettiin kaasugradienttimenetelmällä, jossa otettiin kaasunäytteitä lumikerroksesta 3 mm halkaisijaltaan olevan metalliputken avulla ja CH₄- sekä N₂O-virta maasta lumen läpi ilmakehään laskettiin Fick'n lain avulla.

3.3.3. Tulokset

Viljelykäytössä olevat orgaaniset pellot olivat vuositason kaikkien CO₂:n lähteitä (Taulukko 2, Kuva 12). Kammiomenetelmällä mitatut CO₂-päästöt vaihtelivat nurmella välillä 79–750 g CO₂-C m⁻² ja ohrapellolla 210–830 g CO₂-C m⁻². Netto CO₂-päästö kasvittomilta pinnoilta oli melkein sama, 690–1100 g CO₂-C m⁻², kuin ohrapeltojen päästöt.

EC menetelmällä saatiin pienempiä netto CO₂-päästöjä kammiomittauksilla. Koska CO₂-tase on hyvin herkkä ympäristötekijöille, tämä ero voi osittain johtua vaihtelusta sääolosuhteissa, sillä EC ja kammiomittaukset tehtiin eri vuosina, erilaisissa sääolosuhteissa. Päästöt ovat kuitenkin lähellä aiemmin boreaalisille orgaanisille maatalousmaille arvioituja nettopäästöjä, 400–550 g CO₂-C m⁻².



Kuva 12. CO₂-, N₂O- ja CH₄-virtojen keskiarvot viljelyillä orgaanisilla pelloilla ja peltoheitoilla. Virhejannot ovat keskiarvon keskivirhe. n = mitattujen vuosipäästöjen määrä.

Viljelykäytöstä poisjääneet orgaaniset maat (peltoheito) olivat joko pieniä CO_2 :n sitoimia (maksimi $90 \text{ g CO}_2\text{-C m}^{-2}$) tai CO_2 :n lähteitä (maksimipäästö $900 \text{ g CO}_2\text{-C m}^{-2}$). Kaikilla peltoheitoilla esiintyi kasvukauden aikana CO_2 -sidontaa, mutta kasvukauden ulkopuolella kaikki alueet olivat CO_2 :n lähteitä. Kesimääräinen vuotuinen CO_2 -päästö, $324 \text{ g CO}_2\text{-C m}^{-2}$, on lähellä viljeltyjen orgaanisten peltojen päästöä. Näyttää siltä, että viljelykäytöstä pois jätetyt orgaaniset pellot eivät yleensä nopeasti muutu CO_2 :n nieluksi, vaikka päästö saattaa hie-
man pienentyä viljelykäytössä olevaan peltoon verrattuna (Kuva 12). Viljelemättömien peltojen hitaasti metsittyessä puustoon sitoutuvan hiilen määrä lisääntyy ja pienentää päästöjä. Luontainen metsittyminen on kuitenkin varsin hidasta (Hytönen 1999). Paljailta mailta, joista kasvillisuus on kokonaan poistettu, CO_2 -päästöt olivat samaa luokkaa kuin ohrapellosta.

Viljelykäytössä olevat orgaaniset maat olivat joko pieniä CH_4 :n nieluja tai lähteitä (Kuva 12) riippuen pohjaveden tasosta. Kasvittomilla alueilla CH_4 -ottonopeus oli alempi tai vastaava päästö suurempi (Kuva 12). Vaikka CH_4 -virrat kaikilla koealueilla näyttivät riippuvan sääolosuhteista, CH_4 -vuositaseella ei kuitenkaan ollut tilastollisesti merkitsevää korrelaatiota keskimääräiseen vedenpinnan tason, pH:n, maan C-, N- pitoisuuden tai CN-suhteen kanssa. Vuositasolla kaikki viljelemättömät pellot olivat CH_4 -nieluja, vaikka hetkellisesti kesäaikaan mitattiin pieniä CH_4 -päästöjä. Vaikka ojen kunto oli jo heikentynyt 20–30 vuotta pellon hylkäämisen jälkeen, pohjaveden taso oli silti kohtalaisen syvällä. Keskimääräiset CH_4 :n ottonopeudet viljelemättömillä pelloilla olivat jopa korkeampia kuin viljelykäytössä olevilla pelloilla, eli peltoheitoilla CH_4 :n hapetus voi lisääntyä ajan myötä (Kuva 12).

Keskimääräiset N_2O -päästöt ohrapelloilta olivat korkeammat kuin nurmiviljelmiltä (Kuva 12), mutta kasvittomien alueiden päästöt olivat vähän suu-

rempia. Tämä voi johtua kasvittomien alueiden korkeammasta typen saatavuudesta denitrifikaatiolle. Yllättäen viljelemättömien peltojen N_2O -päästöt olivat samansuuruisia tai jopa suurempia kuin viljeltyjen peltojen päästöt (Kuva 12). N_2O -päästöt peltoheitoilta eivät myöskään näyttäneet pienentyvän ajan myötä hylkäämisen jälkeen. Tulokset eivät siis viitanneet siihen, että viljelytoimenpiteistä luopuminen vähentäisi orgaanisen pellon N_2O -päästöjä.

N_2O -päästöillä oli hyvin suuri ajallinen ja paikallinen vaihtelu ja tätä vaihtelua pystyttiin selittämään vain osittain ympäristötekijöillä kuten lämpötilalla ja sademäärällä. N_2O :n vuosipäästöt eivät korreloineet maan vedenpinnan tason korkeuden kanssa, vaikka kasvukauden aikana joillakin alueilla näin oli. Sekä viljeltyjen että viljelemättömien peltojen CN-suhde sen sijaan korreloi heikosti N_2O :n vuosipäästön kanssa. Klemmedtsson ym. (2005) ovat äskettäin raportoineet, että metsitetyn orgaanisen maan CN-suhde voi ennustaa alueen N_2O -päästöä. Viljelykäytössä olleilla pelloilla voivat muut tekijät, kuten lannoitus ja muokkaus, ja sitä kautta mineraalitypen saatavuus mikrobiologisiin prosesseihin, vaikuttaa enemmän kuin pelkkä CN-suhde. Talvipäästöillä (loka–huhtikuu) oli hyvin merkittävä osuus N_2O :n vuosipäästöistä; nurmella 25 % peltoheitoilla 50 % ja ohralla 60 % vuosipäästöistä. Huomattavaa oli myös se että N_2O :n talvipäästöjen suuruus vaihteli hyvin paljon vuosien välillä.

CO_2 -päästö oli ilmaston lämmitysvaikutukseltaan merkittävin orgaanisten maatalousmaiden kasvihuonekaasupäästöissä. Se vastasi 78 % kaikkien kasvihuonekaasujen globaalista lämmityspotentiaalista (CO_2 :n, N_2O :n ja CH_4 :n summa) 100 vuoden tarkastelujaksolla (IPCC 2001). N_2O -päästö vastasi noin 22 %:sta koko kaasujen globaalista lämmityspotentiaalista. CH_4 :n osuus oli hyvin pieni, alle 1 %.

3.3.4. Johtopäätökset

- Tutkimushankkeen tulosten perusteella hiilidioksidipäästöt peltoheitoilta eivät näytä merkittävästi vähenevän sen jälkeen kun viljelytoimenpiteet ovat loppuneet. Turpeen hajoaminen jatkuu edelleen.
- Tulokset osoittivat, että typioksiduulipäästöt maatalouskäytössä olleilta turvemailta voivat olla suuria vielä 20–30 vuotta viljelyn lopettamisen jälkeen. Talviaikaiset päästöt ovat merkittävä osa typioksiduulin vuositaseesta.
- Metaanin virta ilmakehästä maahan eli metaanin hapetus maassa voi asteittain elpyä maanviljelytoimenpiteiden loppumisen jälkeen, mutta toisaalta ojen kunnon hidas heikkeneminen nostanee maan vedenpintaa, mikä saattaa lisätä metaanipäästöjä. On kuitenkin muistettava, että viljelemättömien peltojen metaanipäästöillä on vain marginaalinen merkitys verrattuna niiltä lähtevien hiilidioksidi- ja typioksiduulipäästöjen ilmastoa lämmittävään vaikutukseen.

3.4. Suopeltojen ja suonpohjien metsittämisen vaikutus kasvihuonekaasujen taseisiin

Jyrki Hytönen, Lasse Aro, Marja Maljanen, Päivi Mäkiranta, Hannamaria Potila, Jukka Laine, Annalea Lohila, Pertti Martikainen, Kari Minkkinen, Mari Pihlatie, Narasinha Shurpali

3.4.1. Tausta

Suonpohjien ja peltojen metsitys muodostaa yhden tärkeimmistä Kioton sopimuksen mukaisista hiilinieluista maassamme. Kioton pöytäkirjan artikla 3.3. antaa mahdollisuuden käyttää maankäytön, maankäytön muutoksen ja metsätalouden (LULUCF) toimia niin kutsuttuina hiilinieluinä. Ilmeisin metsityksen vaikutus on hiilen sitoutuminen kasvavaan puustoon. Kasvihuonekaasujen virroissa tapahtuvia muutoksia on vaikeampi arvioida ja tutkimustuloksia on hyvin vähän.

Suomen maatalouskäytössä oleva orgaanisten maiden pinta-ala (orgaanista ainetta yli 20 % maaperän kiintoaineksesta) on nykyisin n. 300 000 hehtaaria, joka on alle puolet alkuperäisestä viljelykäyttöön otetusta suopinta-alasta (Myllys & Sinkkonen 2004). Peltojen laajamittainen metsitys alkoi Suomessa 1960-luvun loppupuolella maatalouden ylituotannon hillitsemiseksi. Metsitettyjen peltojen kokonaismäärä Suomessa on yli 240 000 hehtaaria (Metsätalastollinen... 2004), josta turvepeltojen osuudeksi on arvioitu noin 80 000 hehtaaria. Suomen soista 1 200 000 ha soveltuu teoriassa turvetuotantoon (Virtanen ja Hänninen 2004). Vuosittain turvetta tuotetaan 42 000–59 000 ha alalla. Turvetuotanto on jo päättynyt yli 20 000 ha alalla (Selin 1999).

Maatalouskäytössä ja turvetuotannossa olevat suot on ojitettu tehokkaasti. Peltomaiden jatkuva maanmuokkaus, lannoitus ja kalkitus sekä kivennäismaan lisäys muuttavat turpeen ominaisuuksia voimakkaasti. Suonpohjia metsitettäessä pyritään epätasapainoista ravinnetaloutta korjaamaan sekoittamalla kivennäismaata turpeeseen tai lannoittamalla. Sekä suopeltojen että suonpohjien turve on hyvin maatunutta, ja sen tiheys ja typpipitoisuus on korkea. Suopellot ja suonpohjat ovat tutkimusten mukaan merkittäviä CO₂-lähteitä.

Tehokkaasta ojituksesta johtuen suopellot ovat pieniä metaanin nieluja. Maatalouskäytössä olevien

turvepeltojen hyvä ojitustilanne voi metsityksen jälkeen alkaa vähitellen huonontua. Maan muokkauksen päätyttyä pintaturpeen happipitoisuus saattaa alentua niin, että maan alhainen happipitoisuus rajoittaa sekä puuston kasvua että hapellista hajotustoimintaa varsinkin, jos kuivatuksen tehokkuudesta ei huolehdita. Samalla myös CH₄-tuotanto näillä alueilla voi lisääntyä.

Maatalouskäytössä olevilta mailta on mitattu maailmanlaajuisesti suuria typpioksiduulin emissioita. Huolimatta suomalaisten viljelyssä olevien turvepeltojen pienestä pinta-alasta niiden on arvioitu vastaavan 25 % antropogeenisistä N₂O-päästöistä Suomessa (Kasimir-Klemedtsson ym. 1997). Metsityksen vaikutuksista N₂O-päästöihin tiedetään vielä vähän (ks. Maljanen 2001b).

Metsityksen vaikutuksia peltojen ja suonpohjien kasvihuonekaasujen taseisiin tunnetaan huonosti. Metsityksen jälkeen tapahtuvat hitaat muutokset maan fysikaalisissa, kemiallisissa ja biologisissa ominaisuuksissa voivat vaikuttaa turpeen hajoamisnopeuteen. Vaikkakin maahengitystä säätelee pääasiassa maan lämpötila ja kosteus, myös turpeen ominaisuuksilla voi olla merkittävä vaikutus mikrobiaktiivisuuteen turpeessa. Metsitys merkitsee vuotuisen viljelykierron korvautumista paljon pidemmällä metsän kiertoajalla. Metsityksen jälkeen myös toistuvat maan muokkaukset, lannoitukset ja kalkitukset päättyvät. Nämä tekijät voivat muuttaa maan ominaisuuksia vähemmän otollisiksi mikrobeille ja siten hidastaa orgaanisen aineen hajoamista ja pienentää CO₂- ja N₂O-päästöjä. Ojaverkoston hidas rappeutuminen puolestaan voi johtaa kohonneisiin CH₄-päästöihin.

Tutkimuksen tavoitteena oli määrittää vuotuiset CO₂-, CH₄- ja N₂O-päästöt tyypillisiltä metsitetyiltä suopelloilta ja suonpohjilta. Lisäksi kuvattiin näiden kaasujen spatiaalinen ja ajallinen vaihtelu sekä tarkasteltiin sääoloista johtuvaa vuosien välistä vaihtelua CO₂-päästöissä.

3.4.2. Tutkimusaineisto ja -menetelmät

Tutkimuskohteet

Tutkimuskohteiksi valittiin 12 koivulle ja männylle metsitettyä entistä suopeltoa eri paikkakunnilta Keski- ja Etelä-Suomesta (kohteet 1–8, 9–12) sekä kuusi metsitettyä suonpohjakohdetta (kohteet 13–18) Aitonevan turvetuotantoalueelta Kihniöstä (Kuva 13). Puulajin (mänty ja koivu), met-

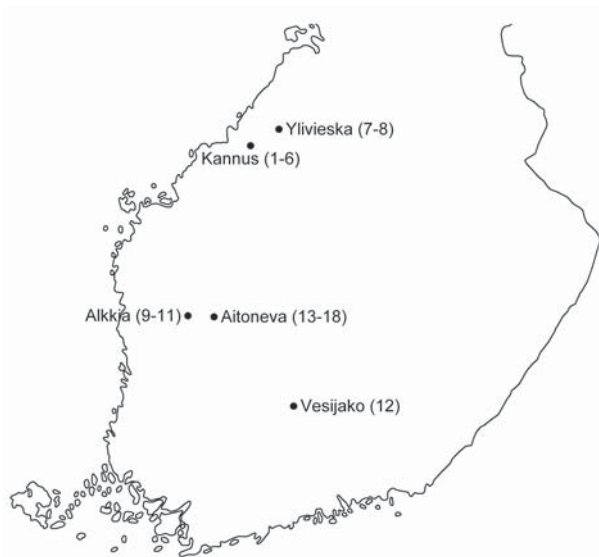


Maahengityksen mittauslaitteistoa metsitetyllä suopellolla (Kuva: Mikulas Cernota).



Lumigradienttimenetelmällä tehtävää kaasunäytteenottoa istutetussa koivikossa entisellä suopellolla (Kuva: Jyrki Hytönen).

sitysiän (10–43 vuotta), puuston tilavuuden ($2\text{--}365\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$) lisäksi myös turpeen paksuus (5 cm – yli 200 cm) kohteilla vaihteli merkittävästi. Maanviljelyn aikana useille pelloille oli lisätty kivennäismaata maanparannusaineeksi ja kolmella suonpohjalla oli metsityksen yhteydessä sekoitunut kivennäismaata pintaturpeeseen. Turpeen tiheys oli metsitetyillä suopelloilla huomattavasti korkeampi kuin ojitusalueiden metsissä.



Kuva 13. Tutkimusalueiden sijainti.

Maan CO₂-vaihtomittaukset

Kohteille sijoitettiin 2–8 mittauspistettä turpeen (”vanha turve”) heterotrofisen CO₂-respiraation eli maan hajottajaeliöiden hengityksen mittaamista varten. Maahan asennettiin alumiiniputki (Ø 31,5 cm) noin 30 cm:n syvyyteen juurihengityksen eliminoimiseksi. Koealoilta poistettiin karike ja kasvipeite ja asennettiin verkko karikkeen kertymisen estämiseksi. Autotrofisen respiraation eli kasvien hengityksen poistamiseksi koealat pidettiin koko ajan kasvipeitteettöminä. Mittauksia tehtiin kannettavalla infrapunakaasuanalysaattorilla koealueesta riippuen kesällä viikoittain ja talvella kerran kuukaudessa 2–3 vuotta vuosina 2002–2005.

Mitatun maan hiilidioksidivirran ja maan 5 cm syvyydeltä samanaikaisesti kammiomittausten kanssa mitatun lämpötilan välille laskettiin kasvukauden ajalle eksponentiaaliset mallit (ks. Mäkiranta ym. 2007). Talvelle (marraskuu–huhtikuu) laskettiin talviaikaisten mittausten keskiarvo. Kaikilla kohteilla mitattiin jatkuvasti maan lämpötilaa 5 cm syvyydestä elektronisilla lämpötilakeräimillä. Koealoittainen vuositaselaskettiin käyttäen tunneittais- ta maanlämpötila-aineistoa ja laadittuja yhtälöitä.

Maan CO₂-vaihdon vuotuinen vaihtelu

Vuotuisen CO₂-vaihdon vaihtelun tutkimiseksi laadittiin 30-vuoden aikasarja maan lämpötiloista

yhdelle metsitetylle pellolle Kannuksessa. Aikasarjan luonnissa käytettiin alun perin Joensuun yliopistossa kehitettyä FINNFOR -hankkeessa tehtyä säägeneraattoria. Vuotuinen maan CO₂-vaihto 30-vuoden ajalle laskettiin koealakohtaisilla yhtälöillä. Keskimääräisiä mittausarvoja käytettiin talviajalle.

CH₄- ja N₂O-vaihto

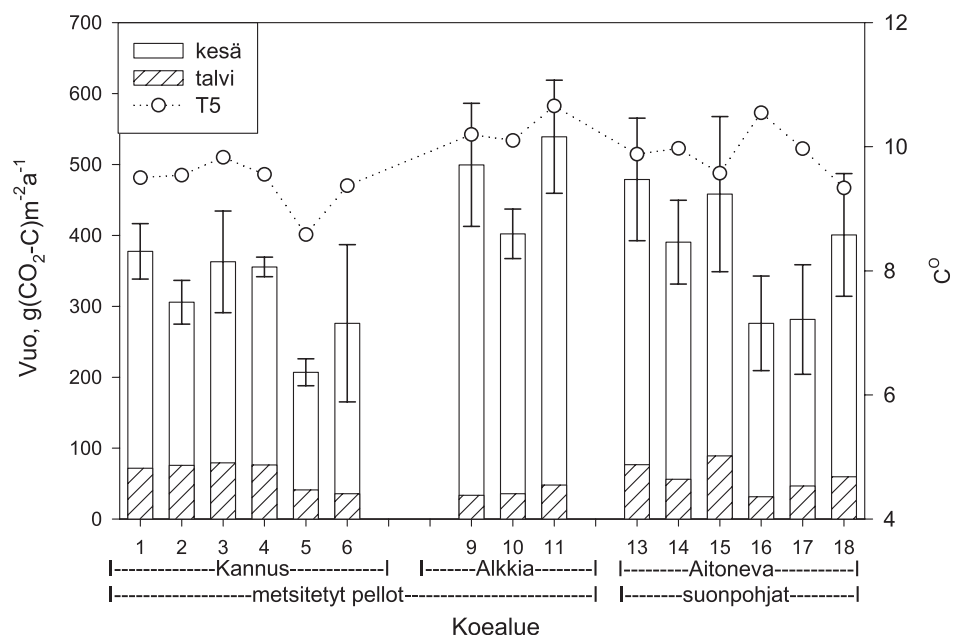
Koealojen rajaukseen käytettiin neliömäisiä alumiinikauluksia (58 cm x 58 cm) muualla paitsi Vesijärvellä ja Aitonevalla, joissa kaulukset olivat pyöreitä (Ø 31,5 cm). Lumettomana aikana CH₄- ja N₂O-mittauksia tehtiin 2–3 viikon välein menetelmällä, jossa käytettiin 30 cm korkeaa alumiinista, tuulettimeella varustettua kammiota. Kaasunäytteet otettiin ruiskuihin (4 kpl 20–35 min mittausaikana) ja analysoitiin kaasukromatografilla. Talvella näytteet otettiin lumigradienntimenetelmällä (Maljanen ym. 2003).

3.4.3. Tulokset

Maan CO₂-tase

Vuotuinen CO₂-päästö tutkituilla metsitetyillä pelto-kohteilla vaihteli 207–539 g CO₂-C m⁻² a⁻¹ välillä (Kuva 14). Päästöt olivat suurempia eteläisemmillä (keskiarvo 480 g CO₂-C m⁻² a⁻¹) kohteilla kuin pohjoisempana (keskiarvo 314 g CO₂-C m⁻² a⁻¹). Suonpohjien CO₂-C vuo oli 275–470 g C m⁻² a⁻¹ keskiarvon ollessa 381 g C m⁻² a⁻¹. Talviaikaisen päästön osuus eri kohteilla vaihteli 9–25 %:n välillä keskiarvon ollessa 16 %.

Kuva 14. Vuotuinen hiileksi muutettu hiilidioksidivirta (CO₂-C) mitatuilla kohteilla. T5 = maan lämpötila 5 cm:n syvyydessä.



Vuotuisen hiilivaihdon sääolosuhteista johtuva vaihtelu 30-vuoden aikasarjan avulla laskettiin Kannuksen kohteelle 6. Koko simulointijaksolla vuotuinen keskimääräinen päästö oli 276 g CO₂-C m⁻² a⁻¹. Kun säämallin aiheuttama 10 % ylivirio otetaan huomioon, saadaan keskimääräiseksi virraksi noin 250 g CO₂-C m⁻² a⁻¹ (Kuva 15). Simuloidut arvot vaihtelivat noin 10 % pitkän ajan keskiarvon molemmiin puolin.

CH₄-tase

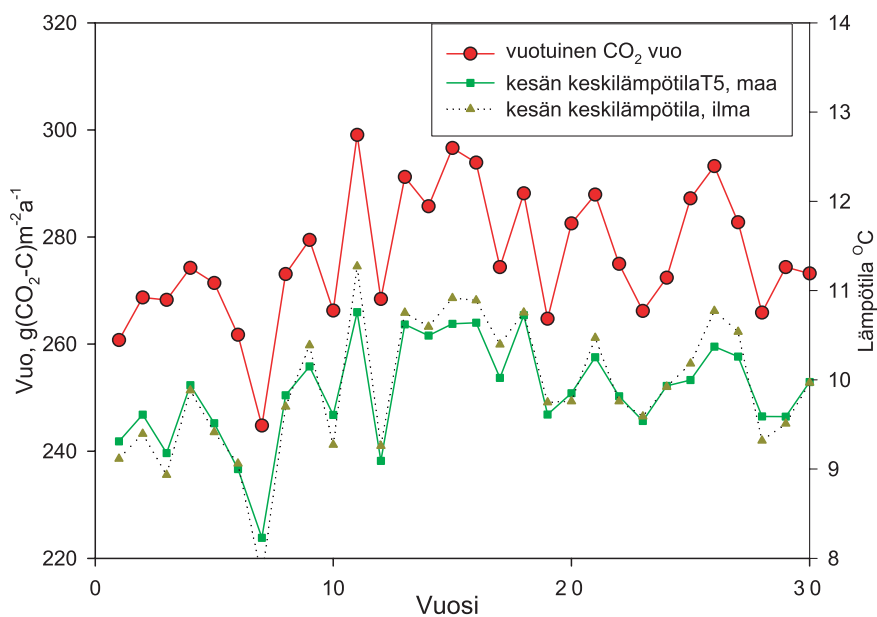
Mitatuista metsitetyistä suopelloista kaikki yhtä lukuun ottamatta olivat metaanin vähäisiä nieluja (Kuva 16). CH₄-tase oli lähes samantasoinen eri maantieteellisillä alueilla. Kohteella 7 oli lyhyitä jaksoja, jolloin metaania vapautui. Näillä oli suuri vaikutus laskettuun keskiarvoon. CH₄-nielu metsitetyillä suonpohjilla oli hieman pienempi kuin metsitetyillä pelloilla.

N₂O-vaihto

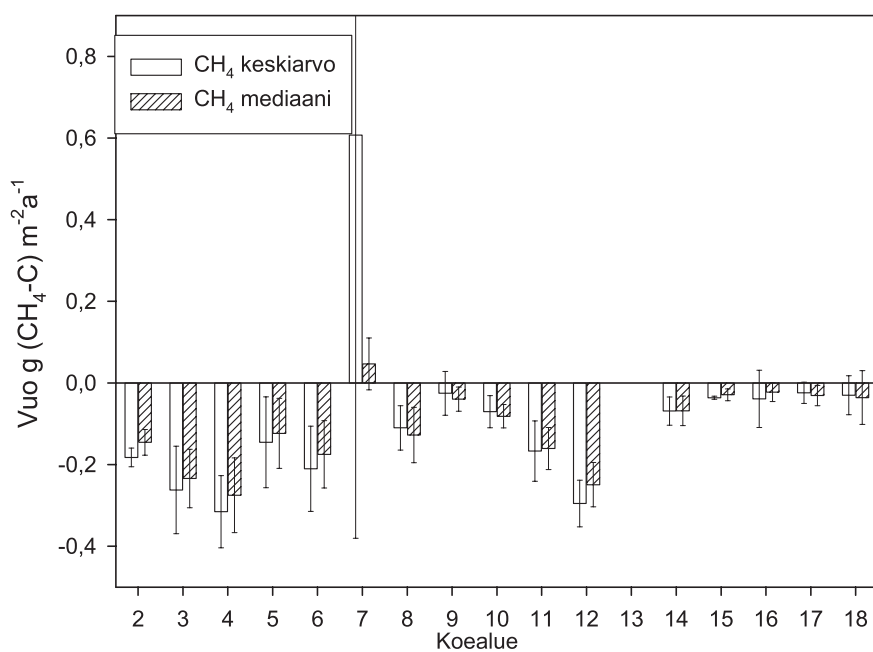
Kaikki tutkitut metsiköt olivat N₂O:n lähteitä (Kuva 17). Vuotuiset päästöt vaihtelivat suuresti eri koe-kohteilla. Vuotuiset N₂O-päästöt metsitetyillä pelto-kohteilla vaihtelivat 0,1–3,0 g N₂O-N m⁻² a⁻¹. Talviaikaiset päästöt olivat keskimäärin 42 % koko vuoden päästöistä.

Keskimääräiset N₂O-päästöt olivat metsitetyiltä suonpohjilta pienempiä kuin metsitetyiltä suopelloilta. Vuotuiset päästöt metsitetyiltä suonpohjakohteilta olivat 0,01–0,48 g N₂O-N m⁻² a⁻¹.

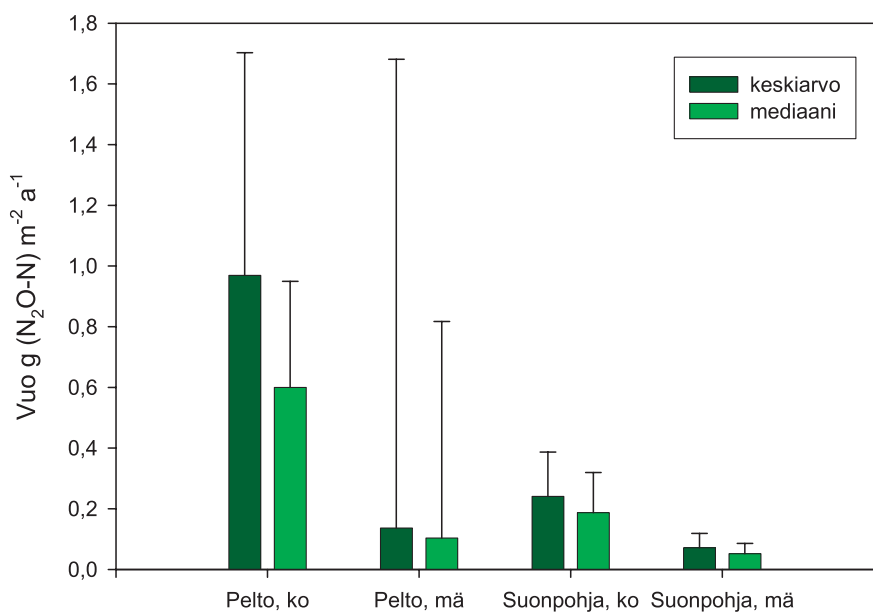
Puulaji, metsikön ikä, puuston tilavuus tai turpeen paksuus ja pohjaveden syvyys eivät selittäneet



Kuva 15. CO₂-taseen vaihtelu 30-vuoden aikasarjassa.



Kuva 16. CH₄-tase tutkituilta suopelloilta ja suonpohjilta.



Kuva 17. Typpioksiduulipäästöt metsitetyiltä suopelloilta ja suonpohjilta. Ko = koivu, mä = mänty.

suoraan N_2O -päästön suuruutta. Maan pintaosan hiilen ja typen suhde (C/N) kuitenkin korreloi vuotuisen N_2O -päästön kanssa siten, että päästöt lisääntyivät eksponentiaalisesti C/N-suhteen kasvaessa.

3.4.4. Tulosten tarkastelu

Maan CO_2 -päästöt

Mitattu maan CO_2 -päästö metsitetyiltä suopelloilta vaihteli välillä 207–539 g CO_2 -C m⁻² a⁻¹. Koska aiempia vertailuarvoja ei ole vastaavilta kohteilta, tuloksia voidaan verrata lähinnä viljelyssä oleviin peltoihin ja metsäojitettuihin soihin. Maan CO_2 -päästöt tässä tutkimuksessa olivat samaa suuruusluokkaa kuin Nykäsen ym. (1995) maataloustuotannossa olevilta turvepelloilta Itä-Suomessa mittaamat päästöt (392–401 g CO_2 -C m⁻² a⁻¹), mutta paljon pienemmät kuin on mitattu turvepelloilta Itä- ja Länsi-Suomessa (Maljanen ym. 2001a: 880–1 120 g CO_2 -C m⁻² a⁻¹, Maljanen ym. 2004: 690–790 g CO_2 -C m⁻² a⁻¹). Ilmastolla, erityisesti kasvukauden lämpöoloilla on suuri merkitys turvemaan hiilitaseeseen. Tämän osoitti tutkimuksessa tehty 30-vuoden aikasarjan laskenta. Varsinaisella tutkimusjaksolla keskimääräinen ilman lämpötila oli 0,5 astetta korkeampi kuin keskimääräinen ilman lämpötila. Siten mitattu vuotuinen CO_2 -päästö oli luultavasti suurempi kuin pitkän aikavälin keskiarvo. Mittaukset maataloustuotannossa olevilla pelloilla on myös tehty erilaisissa ilmastolosuhteissa eri puolilla Suomea. Kun otetaan huomioon tutkimusten erilaiset sääolot, voidaan päätellä, että metsitetyillä pelloilla CO_2 -päästöt olivat pienempiä kuin maataloustuotannossa olevilla pelloilla. Pienempiin päästöihin voi olla syynä mm. vähentynyt maan ilmapitoisuus, kun toistuvat maanmuokkaukset ovat päättäneet, kalkituksen ja lannoituksen loppuminen sekä puuston varjostuksen aiheuttamat alhaisemmat maan lämpötilat. Kaikki nämä tekijät ovat voineet vähentää mikrobiologista aktiivisuutta verrattuna viljeltyihin maatalousmaihin.

Metsitettyjen peltujen CO_2 -päästöt olivat samansuuruisia tai hivenen suurempia kuin on raportoitu metsäojitetuilta turvemailta (Minkkinen ym. 2007: 248–481 g CO_2 -C m⁻² a⁻¹). Metsitetyillä pelloilla maatalouden toimenpiteet ovat suuresti muuttaneet maan ominaisuuksia ja melkein kaikilla kohteilla turpeen tiheys ja tuhkapitoisuus olivat huomattavasti korkeampia kuin metsäojitetuilla soilla. Maan kasvukauden aikaiset lämpötilat suopelloilla ovat nousseet kivennäismaalisäyksen mukana. Kivennäismaalisäys vähentää myös maan happamuutta ja lisää ravinnepitoisuuksia.

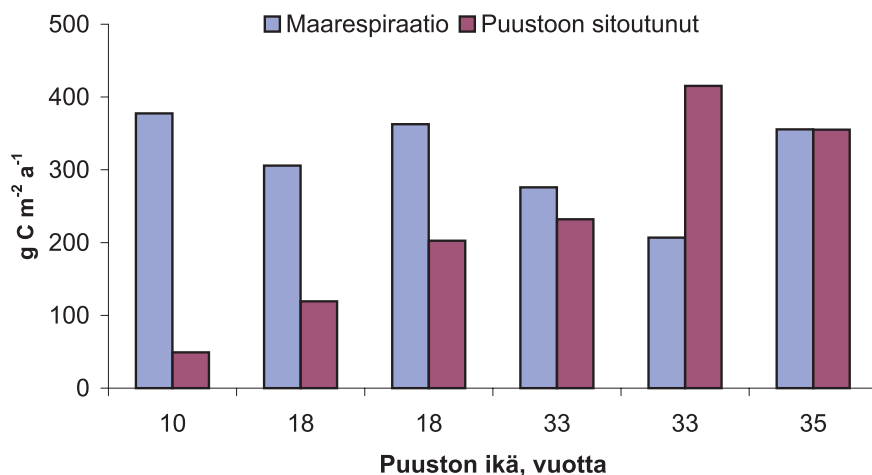
Maan CO_2 -päästöt metsitetyiltä suonpohjilta (vuotuinen päästö keskimäärin 381 g C m⁻² a⁻¹) olivat selvästi suurempia kuin päästöt paljaalta turvepohjalta Aitonevalla 20 vuotta turpeenoston päättämisen jälkeen (kasvukauden aikainen päästö 52–110 g CO_2 -C m⁻² a⁻¹, Tuittila ym. 1999). Tämän tutkimuksen kohteet eivät enää olleet kasvipeitteittämiä vaan olivat olleet metsitettyinä yli 20 vuoden ajan. Ilmeisesti kasvillisuus oli tuottanut uutta hiiltä heterotrofisille mikrobeille lisäten siten maahengitystä. Vaikka karike poistettiin mittauspisteistä ennen mittausten alkua, on siitä ilmeisesti jäänyt hiiltä turvekerrokseen. Kaikki suonpohjat oli lannoitettu metsityksen yhteydessä. Tämä ravinnelisäys on ehkä lisännyt mikrobiologista hajotusaktiivisuutta ja orgaanisen aineen hajoamista verrattuna metsittämättömiin suonpohjiin.

Jotta maahengityksen CO_2 :n tuotoksesta päästäisiin ekosysteemin hiilen nettovaihtoon (NEE), on tunnettava myös hiilen sitoutuminen fotosynteesin kautta ja hiilen poistuminen huuhtoutumalla. Kun otetaan huomioon kasvillisuuteen, pääasiassa puihin sitoutunut hiilimäärä, muuttuu kohteiden hiilitase merkittävästi. Esimerkiksi mikrometeorologisten (eddy covariance) mittausten mukaan 30-vuotias männikkö metsitetyllä suopelloilla oli vain pieni CO_2 -lähde ilmakehään (50 g CO_2 -C m⁻² a⁻¹, Lohila ym. 2007). Tutkimuksen metsitettyjen peltujen puusto mitattiin kaksi kertaa tutkimuksen aikana. Erotuskasvuna biomassayhtälöiden avulla laskettiin vuotuinen biomassatuotos ja muutettiin se hiileksi. Kun puustot olivat noin 30-vuotiaita, vuotuisen puuston kasvuun sitoutui yhtä paljon tai hieman enemmän hiiltä kuin maahengityksessä vapautui (Kuva 18).

Tämän tutkimuksen tulosten mukaan metsitetyillä suonpohjilla, olettaen puuston kasvuksi 46–329 g CO_2 -C m⁻² a⁻¹, maahengityksen CO_2 :tuotos ylittää puuston hiilen sidonnan ja siksi nämä alueet toimivat pääsääntöisesti hiilen nettolähteinä ilmakehään. Tässä tutkimuksessa kuitenkin nopeassa kasvuvaiheessa ollut koivikko oli 30–40 vuodessa sitonut hiiltä sekä maanalaisiin että maanpäällisiin osiin arviolta keskimäärin noin 520 g m⁻² vuodessa, mikä on jonkin verran enemmän kuin samasta koivikosta määritetty heterotrofinen maahengitys (390 g CO_2 -C m⁻² a⁻¹). Myös 43-vuotiaan männikön vastaavasti määritetty hiilen sidonta (270 g m⁻² a⁻¹) oli lähes samalla tasolla kuin maan CO_2 -vuo (281 g CO_2 -C m⁻² a⁻¹).

CH_4 -päästöt

Metsitetyt suopellot toimivat pääasiassa metaanin vähäisinä nieluina kuten metsäojitetut suot ja maatalouskäytössä olevat suopellot. Metsitys ei näytä muuttavan maan CH_4 -virtoja, jos kuivatus on kun-



Kuva 18. Metsitettyjen peltokoh- teiden vuotuinen heterotrofinen maahengitys ja puustoon mit- tausjakson aikana vuosittain sitoutuneen hiilen määrä.

nossa. Kuitenkin yhdellä kohteella mitattiin korkeita CH_4 -päästöjä, mikä saattoi johtua kohteen huonos- ta ojituksesta ja anaerobisista olosuhteista. Koska metsitetyillä pelloilla kuivatus on usein huonossa kunnossa ja maan fysikaaliset ominaisuudet ovat melko epäotolliset maan hyvälle kuivatukselle, riski CH_4 -päästöihin ilman alueen ojien kunnostusta on ilmeinen.

Metsitetyillä pelloilla CH_4 -nielu oli hieman suurempi kuin metsitetyillä suonpohjilla. Tämä voi johtua äärevistä oloista (mm. suuret lämpötilavaihtelut, kuivuus, epätasapainoinen ravinnetalous), mikä on tyypillistä suonpohjille useita vuosia turpeen kor- juun päätyttyä. Lisäksi jäljelle jäänyt turvekerros on useita tuhansia vuosia vanhaa, joten metaania tuottavat populaatiot eivät ole ehkä vielä sopeutu-

neet vallitseviin uusiin olosuhteisiin.

N_2O -päästöt

Maan N_2O -vuot metsitetyiltä suopelloilta olivat samantasoisia kuin on raportoitu maatalouskäy- tössä olevilta suopelloilta, mutta suurempia kuin on esitetty metsäojitetuilta soilta. Metsitettyjä pel- toja ei ollut lannoitettu typellä. Tulokset vahvista- vat aikaisempia tuloksia, joiden mukaan metsitys ei päästä N_2O -päästöjä.

Metsitetyiltä suonpohjilta mitattiin metsitettyjä pel- toja pienempiä N_2O -päästöjä. Metsitetyiltä suon- pohjilta mitatut N_2O -päästöt olivat hieman korke- ampia kuin turpeennostoalueilta mitatut N_2O -pääs- töt. Mitattujen kohteiden välinen vaihtelu oli suurta.

3.4.5. Johtopäätökset

- Tämän tutkimushankkeen tulosten perusteella suopeltojen metsitys vähentää huomattavasti tur- peen hajoamisesta syntyviä hiilidioksidipäästöjä. Päästöjen väheneminen johtuu maanviljelystoi- menpiteiden loppumisesta, jotka nopeuttavat turpeen hajoamista maanviljelyn aikana. Metsitet- tyjen suopeltojen turpeen ominaisuudet poikkeavat suuresti metsäojitetujen soiden turpeiden ominaisuuksista. Metsitettyjen suopeltojen hiilidioksidipäästöt ovat siksi metsäojitettuja soita suu- rempia. Erityisesti suopeltojen muokkaukerrokseen viljelyn aikana lisätty kivennäismaa myötä- vaikutti maan hiilidioksidipäästön kasvuun.
- Tulosten perusteella suonpohjien metsittäminen lisää maan hiilidioksidipäästöjä. Tämä johtuu 1) lannoituksesta ja maanmuokkauksesta, jotka tehdään metsityksen yhteydessä ja 2) uuden tuo- reen hiilen kulkeutumisesta turpeeseen kasvillisuuden mukana. Nämä muutokset maan ominai- suuksissa todennäköisesti lisäävät maan mikrobiologista aktiivisuutta ja siten hengitystä.
- Maan typpioksiduulipäästöt eivät muutu metsityksen jälkeen, vaan jatkuvat edelleen melko suurina.
- Maan metaanipäästöt eivät muutu metsityksen jälkeen. Kohteet ovat pieniä metaanin nieluja.
- Suopeltojen metsittäminen vähentää näiden maiden kasvihuonekaasuvaikutusta, erityisesti kun hiilen sitoutuminen kasvavaan puustoon otetaan huomioon. Suonpohjien metsittäminen lisää aluksi kasvihuonekaasuvaikutusta, mutta kasvatusmetsävaiheessa olevien suonpohjapuustojen hiilen sidonta kompensoi kuitenkin suotuisissa oloissa vanhan turpeen hajoamisesta tulevat päästöt.

3.5. Ekosysteemitason hiilinielumittaukset puustoisilla turvemilla

Tuomas Laurila, Annalea Lohila, Mika Aurela, Juha-Pekka Tuovinen, Tea Thum, Lasse Aro, Jukka Laine, Timo Penttilä, Kari Minkkinen, Terhi Riutta, Janne Rinne, Mari Pihlatie, Timo Vesala

3.5.1. Tausta ja tavoitteet

Ilmakehän ja ekosysteemin välinen hiilidioksidin vaihto kattaa sekä kasvuun sitoutuvan nielun että kasvustosta ja maaperästä tulevan maahengityksen. Hiilen kertyminen maanpinnan yläpuoliseen puustoon voidaan mitata puuston kasvusta ja maahengitystä voidaan mitata kammiotekniikalla. Metsän tai suon kokonaisuutta, mikä kattaa sekä puuston, mukaan lukien juuristo, ja aluskasvillisuuden hiilinielut että maanpinnan ylä- ja alapuoliset kasvu- että maahengityksen komponentit voidaan nykyisin mitata vain mikrometeorologisella menetelmällä. Menetelmä tuottaa aluekeskiarvotulosta jatkuvana aikasarjana ja sitä pidetään referenssimenetelmänä kaasujen ekosysteemitason ilmakehävaihdon tutkimuksessa. Maailmassa on nykyisin jo useita satoja mikrometeorologisia mittaushaikoita arktiselta alueelta tropiikkiin. Tässä tutkimusohjelmassa oli mahdollisuus ylläpitää yhtä mittaushaikoja. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää ekosysteemitason hiilitase puustoisilla metsäoijetuilla soilla ja metsitetyillä turvepelloilla. Olemme mitanneet muissa tutkimushankkeissa myös turvepellon ja luonnontilaisen suon kaasutaseita, joihin tässä hankkeessa tehtyjä havaintoja verrataan.

3.5.2. Tutkimusaineisto ja menetelmät

Mittaushaikoiksi valittiin kaksi puustoista kohdetta, koska ne ovat erityisen ongelmallisia pelkäämään kammiomittauksilla tutkittaviksi. Toinen oli metsitetty turvepelto ja toinen ojitettu metsää kasvava suo. Tutkimuksen mittaushaikojen sijainti on esitetty kuvassa 19. Parkanon Alkkian suo raivattiin pelloksi 1937 ja istutettiin männulle 1971. Peltonraivauksen yhteydessä alueelle tuotiin mineraalimaata ja metsänkasvatusta ajatellen paikka on lannoitettu kahdesti. Turpeen paksuus on kohteella 1,5 m ja puuston pituus oli mittaushetkellä 12



Kuva 19. Tutkimushankkeen mittaushaikojen sijainti.

m. Lopen Kalevansuo ojitettiin ja lannoitettiin 1971. Turpeen paksuus on 3 m ja puuston pituus on 10–16 m. Jokioisten Kuuman pelto on ollut maanviljelyssä vähintään sata vuotta, minkä vuoksi turpeen paksuus on enää 0,6 metriä ja koostumukseltaan se alkaa lähestyä multamaata. Kaamasen ja Ruoveden Siikanevan sarasuot ovat luonnontilaisia. Turpeen paksuus Kaamasen suolla on noin 1 m ja Siikanevalla 2–4 m. Vuoden keskilämpötila Kaamasessa on -1°C , minkä vuoksi suon turvekerros alkaa rakenteeltaan jo hieman muistuttaa vielä pohjoisempaa esiintyviä palsasoita. Siikanevalla kasvukausi on pidempi ja vuoden keskilämpötila on 3°C .

Tutkimuksessa käytettiin ns. mikrometeorologista menetelmää (torni- I. eddy covariance -menetelmä). Menetelmä perustuu siihen, että kohteeseen kajoamatta voidaan sen yläpuolelta mitata kuinka



Varputurvekankaan männikköä vanhalla rämeen ojitusalueella (Kuva: Sakari Sarkkola).

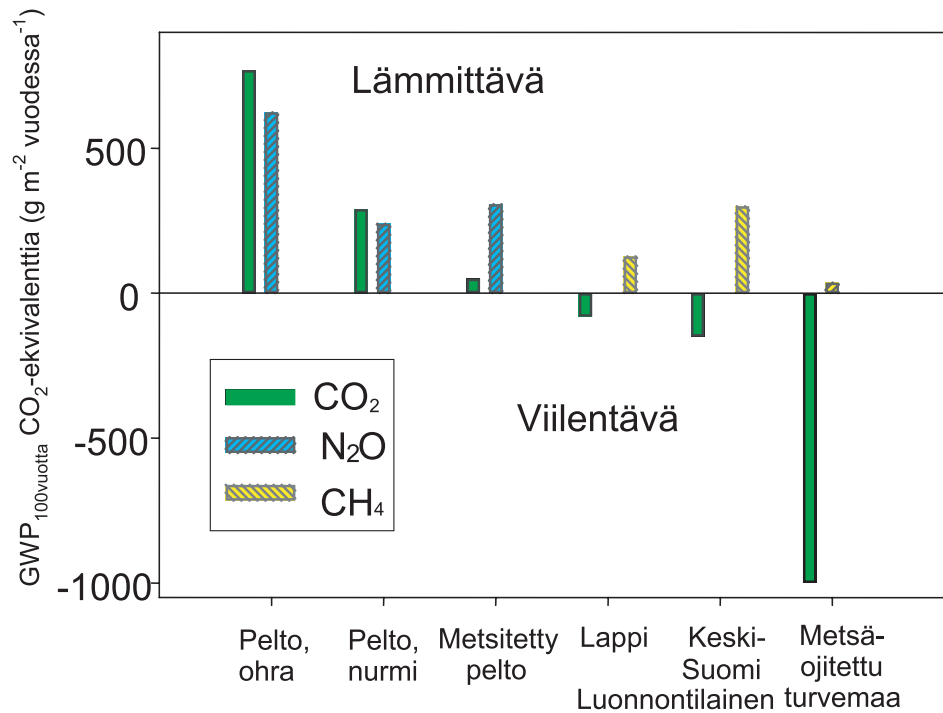
kaasu siihen kulkeutuu ilmakehän alimmassa osassa. Menetelmässä kohteen yläpuolella ulottuvassa mastossa on turbulenttisia tuulikomponentteja mittaava anemometri. Samasta pisteestä mitataan kaasupitoisuutta analysaattorilla. Mittaustaajuudella 10 kertaa sekunnissa otetuista näytteistä lasketaan kovarianssi kaasupitoisuuden vaihteluista ja tuulipyörteiden ainetta kuljettavasta pystykomponentista. Mittaus on automaattinen ja se toimii kaikkina vuodenaikoina päivin ja öin. Mittaustulos edustaa useiden hehtaarien aluekeskiarvoa eli se tuottaa lähtökohtaisesti ekosysteemitason ainetaseita.

Tutkimuksessa CO_2 -virrat mitattiin mikrometeorologisella menetelmällä ja N_2O - ja CH_4 -virrat kammiolla metsitetyllä turvepellolla Alkkiassa ja ojitusalueen metsässä Kalevansuolla. Näitä menetelmiä käytettiin myös vertailupaikoilla paitsi metaanivuot Siikanevalta ja Kaamasesta perustuvat myös mikrometeorologiseen menetelmään.

3.5.3. Tulokset

Mitatusta CO_2 -virta-aikasarjasta on laskettu vuosisekiesiärvot jotka esitetään kuvassa yksiköissä grammaa CO_2 :a neliometriä kohden vuodessa (Kuva 20). Vastaavasti N_2O - ja CH_4 -havainnoista on laskettu vuosipäästö joka on globaalin lämmityspotentiaalin avulla muutettu vastaamaan CO_2 -tasetta. Lämmityspotentiaali ottaa huomioon kuitenkin kaasun säteilyn absorption ja viipymääjan ilmakehässä.

Suurimmat CO_2 -päästöt lähtivät viljelykäytössä olevasta turvepellosta. Metsitetyn turvepellon CO_2 -tase oli lähes neutraali. Luonnontilainen suo Kaamasessa oli pieni CO_2 :n nielu kun vastaavasti Siikanevan nielu oli siihen nähden kaksinkertainen. Ojitusaluemetsä Lopella oli suuri CO_2 :n nielu. CH_4 -päästöt luonnontilaisilta sarasoilta olivat melko suuria, kun tarkastellaan niiden lämmitysvaikutusta. Kuivattujen turvemaiden CH_4 -taseet olivat hyvin pieniä. N_2O -päästöt maatalouskäytössä olleilta mailta olivat kuitenkin varsin suuria.



Kuva 20. Turvemaiden KHK-taseet mittauskoh-teilla maankäyttömuodoit-tain.

3.5.4. Johtopäätökset

- Tutkimushankkeessa tutkitut aapasuot sitoivat ilmakehän hiilidioksidia suurin piirtein samoin kuin ne ovat keskimäärin tehneet tuhansien vuosien aikana. Ilmastonmuutoksen tai muun vastaavan ulkoisen tekijän ei havaittu muuttaneen tutkittujen kohteiden hiilensitomiskykyä merkittävästi. Luon-nontilaisista aapasoista metaanipäästöt ovat niin merkittäviä että niiden kokonaisvaikutus ilmas-toon on lämmittävä.
- Turvepellot ovat hiilidioksidin lähteitä ilmakehään, turpeen voimakkaan hajoamisen vuoksi. Suo-raa päästöä pellosta ilmakehään voidaan jossain määrin hillitä nurmiviljelyllä verrattuna viljakas-veihin, koska pidemmän kasvukauden myötä vuositase on vähemmän epäedullinen. Nurmivilje-lyssä pellolta kuitenkin viedään pois selvästi enemmän biomassaa, minkä vuoksi se on maape-rän hiilivaraston säilymisen kannalta viljanviljelyä huonompi vaihtoehto. Ilmastovaikutuksen kan-nalta turvepeltojen typpioksiduulipäästöt ovat merkittäviä ja ne ovat lämmitysvaikutuksiltaan samaa suurusluokkaa kuin hiilidioksidipäästöt.
- Tulosten perusteella turvepellon metsittäminen muuttaa sen nettohiilitasetta ilmastovaikutusten kannalta selvästi parempaan suuntaan. Länsisuomalaisella mittaushaavalla puustoon ja alus-kasvillisuuteen sitoutuva hiilidioksidi pystyi kompensoimaan voimakkaan turpeen hajoamisesta tulevan hiilidioksidipäästön. Aluskasvillisuus ja karikedynamiikka muodostavat hiilen nielu, jotka eivät tule esiin pelkästään puuston kasvu- ja maahengitysmittauksilla. Typpioksiduulivirrat olivat metsitetyn pellon suurin ilmastoa lämmittävä päästö, joka johtuu typenkiertoon vaikuttaneista maanparannus ja viljelytoimista.
- Tämän hankkeen tulokset osoittavat, että metsäojitettu suo on suuri hiilinielu, joka suuruudeltaan vastaa parhaassa kasvussa olevaa mineraalimaalla kasvavaa metsää.
- Tulosten edustavuuden parantamiseksi mittaushaavoihin olisi järkevää ottaa myös luonnontilai-nen rahkasuo sekä erityyppisiä ojitettuja suometsiä, joita seurattaisiin useampi vuosi vuosien välisen vaihtelun kuvaamiseksi. Tarkastelussa tulisi ottaa huomioon metsän koko kasvukierro ja myös arvioida sitä, mikä on metsästä ja pellolta pois viedyn biomassan ilmastovaikutus.

3.6. Soistetut suonpohjat ja niiden hiilikaasudynamiikka

Eeva-Stiina Tuittila, Mirva Leppälä, Mika Yli-Petäys, Sanna Kivimäki, Terhi Riutta, Jukka Laine, Harri Vasander, Kari Minkkinen, Kari Kukko-Oja, Jukka Alm, Sanna Saarnio

3.6.1. Tausta ja tavoitteet

Suomessa korjataan turvetta pääosin energiakäyttöön. Turpeen korjuun aikana suo kuivataan ja siitä poistetaan elävä kasvillisuus ja tuhansien vuosien aikana kerrostunut turvekerros. Varsinkin energiaturvekäytössä turpeen korjuu on tehokasta, sillä syvemmissä kerroksissa olevalla saraturpeella on suurempi energiasisältö kuin pintakerrosten rahkaturpeella, joka taas soveltuu paremmin kasvuturpeeksi. Näin turpeen korjuun jäljiltä paikalle jää kasviton suonpohja, jossa olosuhteet ovat epäedulliset uuden suokasvillisuuden muodostumiselle. Nämä kasvittomat suonpohjat eivät enää sido ilmakehän CO₂:a, mutta paikalle jäänyt orgaaninen aines eli ns. jäännösturve hajoaa hapellisissa oloissa niin, että suonpohjat toimivat hiilen lähteinä ilmakehään. Toisaalta tällaiset suonpohjat eivät enää vapauta metaania ilmakehään kuten luonnontilaiset suot. Nämä kuivat alat, joilta tuore orgaaninen aines puuttuu, saattavat olla jopa pieniä CH₄-nieluja.

Ennallistamisella pyritään saamaan paikalle uusi toimiva suoekosysteemi, joka lajistoltaan ja ainevirroiltaan muistuttaa luonnontilaista suota. Onnistunut ennallistaminen eli uudelleensoistaminen siis johtaisi kohti ekosysteemiä, joka toimisi CO₂-nieluna ja CH₄-n lähteenä. Suomessa tehdyt, tästä aiheesta ensimmäiset tutkimustulokset osoittivat, että suonpohja voi hyvinkin nopeasti lähteä kehittymään kohti toiminnallista suota, jopa ennen kuin sen kasvillisuus on vakiintunut luonnontilaisen suon kaltaiseksi (Tuittila ym. 1999, 2000). Tuota ensimmäistä työtä on seurannut useita eurooppalaisia ja pohjoisamerikkalaisia tutkimuksia, jotka tukevat saatua tulosta (mm. Waddington ym. 2003, Bortoluzzi ym. 2006).

Suonpohjille, joilta turve on tehokkaasti korjattu, näyttää kehittyvän sarasoiden kasvillisuutta muistuttava lajisto, jossa tupasvilla ja sarat vallitsevat. Sarakasvit ovat tehokkaita hiilen sitoja. Suuri osa sarojen karikkeesta päätyy suoraan hapettomiin oloihin. Koska hapeton hajotus ilmeisesti käynnistyy melko hitaasti pitkällisen kuivuuden jälkeen,

nuoret ennallistetut suonpohjat voivat olla hyvinkin tehokkaita hiilen sitoja. Ei kuitenkaan tiedetä kuinka kauan tämä tehokas hiilensidontavaihe kestää tai kuinka yleispätevä havaittu ilmiö on. Turvetuotanto alkoi laajamittaisesti vasta 1970-luvulla, joten suonpohjien ennallistaminen on vielä melko uusi maankäyttömuoto. Siksi ei vielä ole olemassa tietoa, jonka pohjalta voitaisiin arvioida ennallistettujen suonpohjien kasvihuonevaikutusta pidemmällä ajanjaksolla.

Tässä tutkimuksessa pyrimme arvioimaan ennallistettujen suonpohjien hiilikaasuvaihtoa pidemmällä aikavälillä kuin muutamana ensimmäisenä ennallistamista seuraavana vuotena. Siihen käytämme kolmea eri näkökulmaa: 1) arvioimme kasvukauden aikaista hiilikaasunvaihtoa kymmenen vuotta sitten ennallistetulla suonpohjalla suhteessa kasvillisuuden määrään, 2) tarkastelemme hiilikaasunvaihtoa vanhoilla turpeennostoaloilla, joilta turpeen nosto päättyi noin 50 vuotta sitten ja 3) rinnastamme suonpohjan kehityksen suon luontaiseen varhaiskehitykseen ja tarkastelemme hiilikaasunvaihtoa maankohoamisrannikolla sijaitsevalla eri-ikäisten soiden muodostamalla ikäsarjalla.

3.6.2. Aineisto

Käytämme tarkastelussa kahdelta eri alueelta kerättyä aineistoa. Aitonevan alueelta ensimmäisenä kohteena on kymmenen vuotta sitten, syksyllä 1994, ennallistettu suonpohja ja toisena turpeennostoalat, joilta turpeen nosto ns. laahakauhamenetelmällä, on lopetettu noin 50 vuotta sitten. Kymmenvuotiaalta alalta kasvillisuutta ja hiilikaasunvaihtoa mitattiin vuosina 2003 ja 2004 ja viisikymmenvuotiaalta alalta vuosina 2000 ja 2001. Siikajoen alueelta kohteena ovat viisi alaa, jotka yhdessä muodostavat ikäsarjan alkaen noin satavuotiaasta suonalusta ja päättyen noin 2500 vuotiaaseen suohon. Tällä ikäsarjalla kasvillisuutta ja hiilikaasunvaihtoa mitattiin vuosina 2002–2005.

Kaikilla kohteilla hiilikaasunvaihtoa mitattiin kammiomenetelmällä, joka mahdollistaa kunkin alan sisäisen vaihtelun tarkastelun. Kasvillisuutta tutkittiin sekä arvioimalla kunkin lajin peittävyys että seuraamalla kasvustojen kasvukauden aikaista kehitystä. Kasvillisuuden tarkastelu oli olennaista, koska sen tulo ennallistettavalle alalle on kynnysteikijä hiilen sidonnalle systeemiin.

Kymmenvuotiaalle alalle oli muodostunut eri kasvilajien vallitsemia kasvustoja. Tarkoituksenamme

Soistunut vanha turpeen-
nostoalue Kihniön Aitone-
valla. Turve on nostettu ns.
laahakauhamenetelmäl-
lä. Korjuu on lopetettu
v. 1948, jonka jälkeen suo-
kasvit – rahkasammalet ja
suursarat – ovat vallanneet
alueen. Alueesta on muo-
dostunut toiminnallinen tur-
vetta kerryttävä suoeko-
systeemi (Kuva: Mika Yli-
Petäys).



tällä alalla oli verrata näiden hiilikaasunvaihtoa ja suokasvillisuuden määrän merkitystä ennallistetun suonpohjan hiilikaasunvaihdolle, joten otannassa emme suhteuttaneet aloja eri kasvustotyyppien runsauteen, vaan valitsimme alat subjektiivisesti. Alat sijoitettiin neljään eri kasvustotyyppiin niin, että kunkin tyyppin sisällä oli vaihtelua kasvillisuuden määrässä. Yhteensä aloja oli 19. Aineistoon sisältyi kolme kontrollinäytealaa, joilta vähäinenskin kasvillisuus poistettiin. Tutkiaksemme kasvilajien suhdetta vedenpintaan, laajensimme otantaa yhdeksällätoista näytealalla, jotka sijoitettiin systemaattisesti lähelle valittuja aloja.

Viisikymmenvuotiaalla alalla otanta kattoi viisi turpeennostoalaa, johon kuhunkin sijoitettiin kolme näytealaa kasvillisuuden ja hiilikaasunmittauksia varten.

Siikajoen alueelta kohteena ovat viisi alaa, jotka yhdessä muodostavat ikäsarjan noin satavuotiaasta suonlusta noin 2 500 vuotiaiseen suohon. Kullekkin alalle sijoitettiin 8–12 näytealaa kasvillisuuden ja hiilikaasujenvaihdon mittauksia varten.

Turpeennostoaloilla ja ikäsarjalla pyrimme otannalla kattamaan kullekin alalle ominaisen sisäisen vaihtelun kosteuden ja kasvillisuuden suhteen.

3.6.3. Tulokset

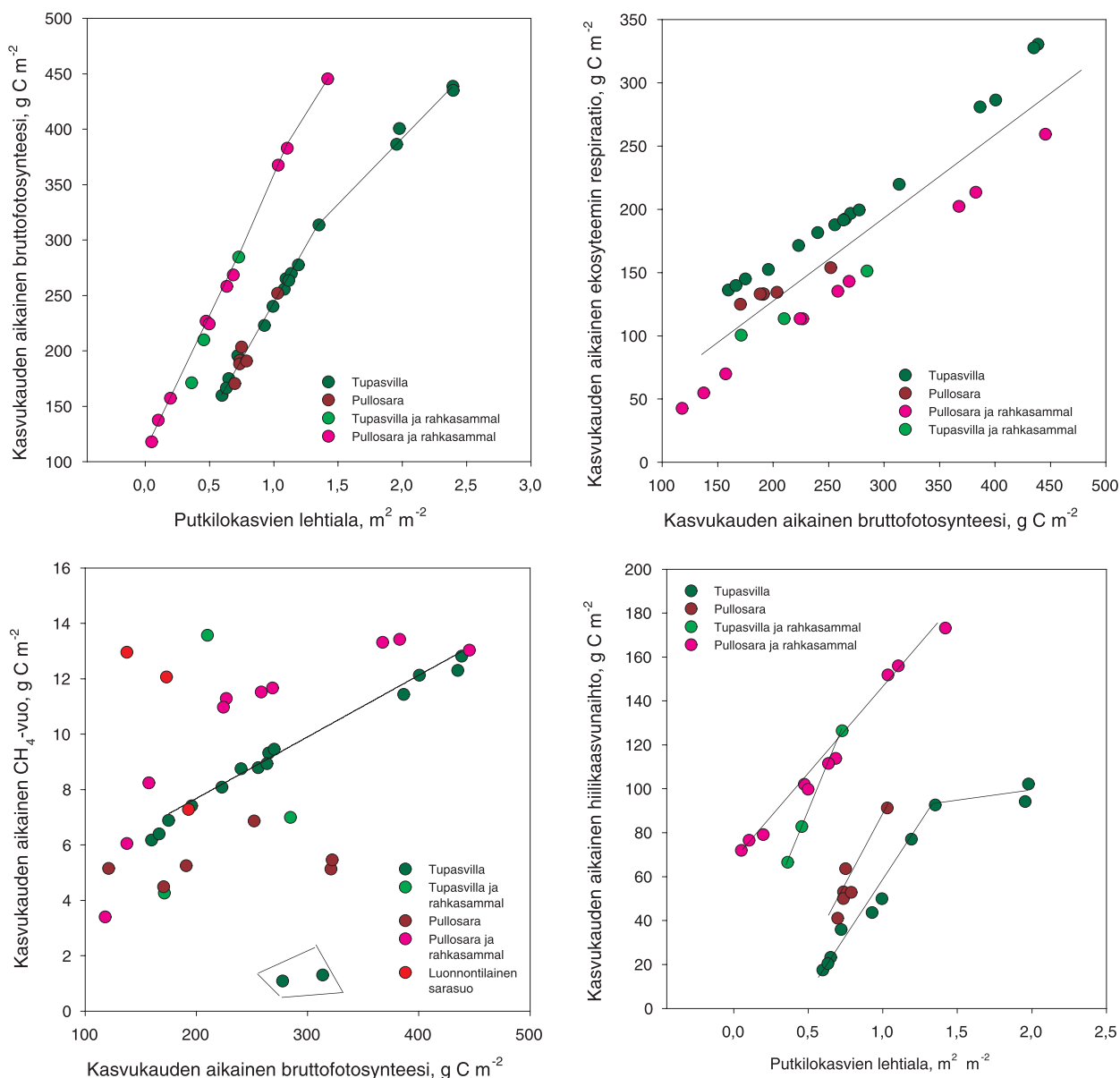
Kymmenvuotias soistettu suonpohja

Kymmenen vuotta sitten ennallistetulla suonpohjalla kasvillisuus oli erilaistunut niin, että tupasvilla kasvoi runsaampana kuivemmissä oloissa kuin

pullosara, jonka esiintyminen rajoittui niihin osiin, joissa vedenpinta oli jatkuvasti lähellä maanpintaa. Rahkasammalia tavattiin runsaana vain märissä oloissa, mutta yleisesti sammallajistossa oli selvää erilaistumista niin, että kuivemmatkin olot suosivat joitakin lajeja. Kullekin paikalle oli siis kymmenessä vuodessa valikoitunut niissä kosteusoloissa tehokkaimmin toimiva lajisto. Kasvi-
peitteen aukkoisuus osoitti, että kasvillisuuden leviäminen alueelle oli vielä kesken.

Fotosynteesi oli suoraan sidoksissa suokasvien lehtialan määrään. Fotosynteesitehokkuus oli suurempi niillä näytealoilla, joilla kasvoi sekä putkilokasveja että rahkasammalia kuin aloilla, joilla kasvoi vain putkilokasveja (Kuva 21). Vastaavasti fotosynteesi säätelä kasvukauden aikaista ekosysteemin respiraatiota niin, että 50–75 % kasvien sitomasta CO₂:sta vapautui takaisin ilmakehään. Vedenpinnan säätely näkyi siinä, että respiraation osuus fotosynteesistä oli selvästi pienempi runsaasti rahkasammalta kasvavissa märissä oloissa (Kuva 21). Myös kasvukautisen CH₄-virran taso oli sidoksissa kasvien sitoman uuden hiilen määrään. Toisin kuin respiraatio, CH₄-virta ilmakehään oli suurempi märiltä aloilta (Kuva 21). Kaikki kasvustot toimivat CH₄:n lähteenä ilmakehään, mutta CH₄:na vapautuvan hiilen osuus kasvien sitomasta hiilestä oli edelleen pienempi kuin luonnontilaisella saranevalla.

Kasvukauden aikainen hiilen nettovaihto oli kaikissa kasvustoissa positiivinen niin, että ne toimivat hiilinieluinä (Kuva 21). Hiilinielun suuruus taas oli vahvasti sidoksissa kasvillisuuden määrään. Nuorella suonpohjalla putkilokasvien ja rahkasammalten sekakasvustot olivat selkeästi tehokkaam-



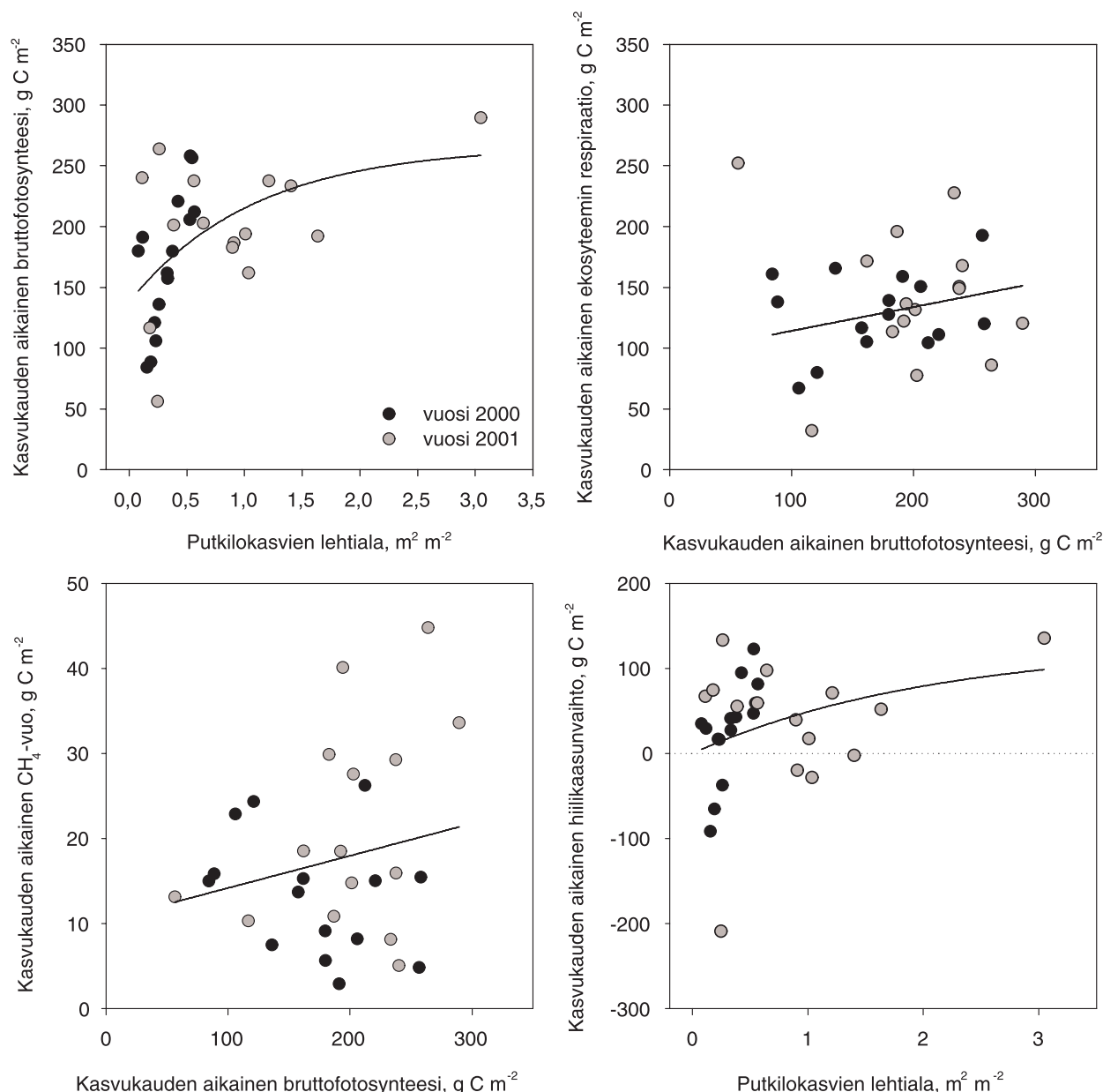
Kuva 21. Kymmenen vuotta sitten soistetun suonpohjan kasvukauden aikainen hiilikaasuvaihto erilaisissa kasvustoissa. Ylhäällä vasemmalla: Fotosynteesin suhde putkilokasvien lehtialaan. Ylhäällä oikealla: Ekosysteemin respiraation suhde fotosynteesiin. Alhaalla vasemmalla: Metaanivuon suhde fotosynteesiin. Vertailuna on luonnontilainen saraneva (Siikaneva, Ruovesi), joka kasvilajistoltaan on lähellä kymmenvuotiaasta ennallistettua suonpohjaa. Kaksi muita kuivempaa tupasvillaa kasvavaa alaa (ympäröidyt) poikkesivat selvästi muista. Alhaalla oikealla: Ekosysteemin hiilikaasuvaihto suhteessa lehtialaan. Positiiviset luvut kertovat kasvustojen sitoneen hiiltä enemmän kuin niiltä on vapautunut.

pia hiilinieluja kuin yhden lajin sarakasvustot. Kun kasvittomilta turvepinnoilta vapautui kasvukauden aikana CO_2 :a 20–71 $\text{g CO}_2\text{-C m}^{-2}$, sarakasvustojen CO_2 -nielu oli 17–102 $\text{g CO}_2\text{-C m}^{-2}$ ja putkilokasvien ja rahkasammalten sekakasvustojen 67–173 $\text{g CO}_2\text{-C m}^{-2}$ suuruinen. Sarakasvustoista vapautui kasvukauden aikana hiiltä CH_4 :na 1–9 $\text{g CH}_4\text{-C}$ ja sekakasvustoista 3–14 $\text{g CH}_4\text{-C}$. Jos oletetaan, että kasvukauden ulkopuolinen hävikki on 15 % vuotuisesta CH_4 :n ja CO_2 :n hävikistä, saadaan sarakasvustoihin vuotuisesti hiilitaseeksi –5–44 g C m^{-2} ja putkilokasvien ja rahkasammalten sekakasvustojen

60–128 g C m^{-2} . Lähes kaikki kasvustot siis toimivat hiilen nieluina, mutta sekakasvustoissa nielu oli suurempi.

Viisikymmenvuotias turpeennostoalue

Laakakauhamenetelmällä korjatut turpeennostoalat olivat suokasvillisuuden vallitsemia, ja niille oli kehittynyt vanhan turpeen päälle rahkasammalten ja putkilokasvienjäänteiden muodostama uusi noin 30–70 cm paksu orgaaninen kerros. Vallitseva kasvillisuus oli vähäravinteisille saranevoille tyypillistä, mutta lajistossa oli mukana aapasoille

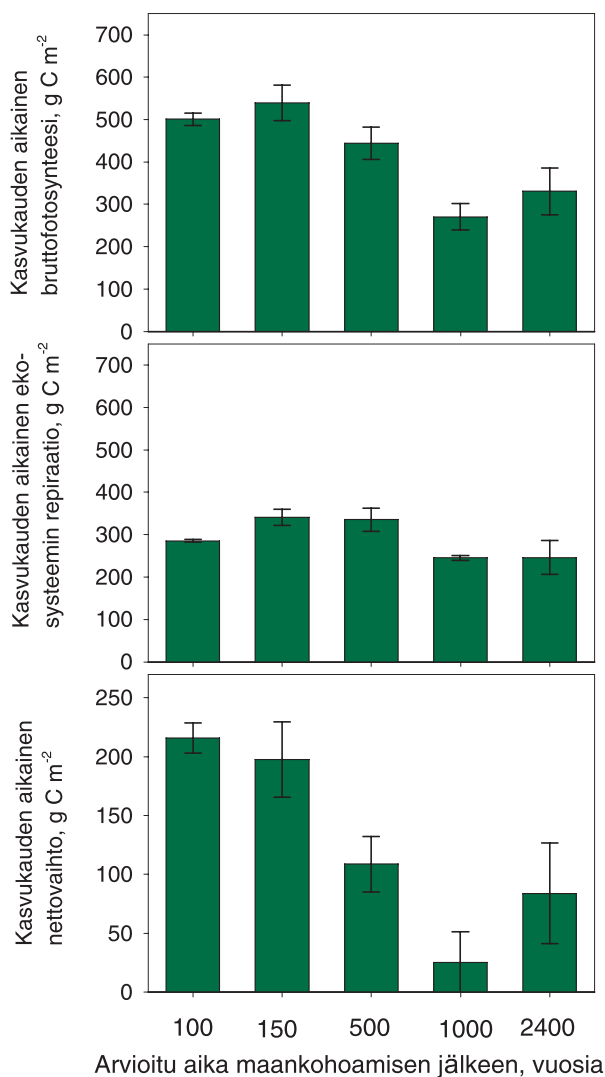


Kuva 22. Turpeennostoalan kasvukauden aikainen hiilikaasunvaihto viisikymmentä vuotta turpeen noston lopettamisen jälkeen. Ylhäällä vasemmalla: Fotosynteesin suhde putkilokasvien lehtialaan. Ylhäällä oikealla: Ekosysteemin respiraation suhde fotosynteesiin. Alhaalla vasemmalla: Metaanivuon suhde fotosynteesiin. Alhaalla oikealla: Ekosysteemin hiilikaasunvaihto suhteessa lehtialaan. Positiiviset luvut kertovat kasvillisuuden sitoneen hiiltä enemmän kuin alalta on vapautunut, negatiiviset taas kertovat hävikistä ilmakehään.

tyypillisiä lajeja, jotka ovat yleistyvät soilla vasta pohjoisempaan. Putkilokasvien lehtiala oli turpeennostoaloilla samansuuruinen tai pienempi kuin kasvustoissa kymmenvuotiaalla ennallistetulla suonpohjalla (Kuva 22), mutta kaikki näytealat olivat rahkasammalen peittämiä.

Tulokset hiilikaasunvaihdesta viisikymmenvuotiaalta turpeennostoaloilta olivat jossakin määrin hämmentäviä. Toisin kuin kehittyneen kasvillisuuden ja uuden orgaanisen kerroksen pohjalta voisi olettaa, nämä alat olivat kumpanakin tutkimusvuonna heikkoja hiilen sitojia. Vaikka kasvukauden aikana fotosynteesissä sidotun hiilen määrä oli suurempi

kuin CO₂:na ja CH₄:na vapautuneen hiilen suurimmalla osalla aloista, jo kasvukauden aikana kolme näytealoista toimi kumpanakin vuonna hiilen lähteenä ilmakehään. CO₂-tase näytealoilla vaihteli -196–177 g CO₂-C m⁻² välillä. Turpeennostoalojen bruttofotosynteesi oli pienempää kuin kymmenvuotiaalla alalla, mutta alojen respiraatio oli samaa suuruusluokkaa (Kuvat 21 ja 22). CH₄-virta ilmakehään oli suurempi viisikymmenvuotiaalta alalta kuin kymmenvuotiaalta (Kuvat 21 ja 22). CH₄:a vapautui kasvukauden aikana 3–87 g CH₄-C m⁻². Heikon bruttofotosynteesin ja tehokkaan hajotuksen johdosta keskimääräinen kasvukauden hiilitase oli vain 32 g C m⁻². Kun tal-

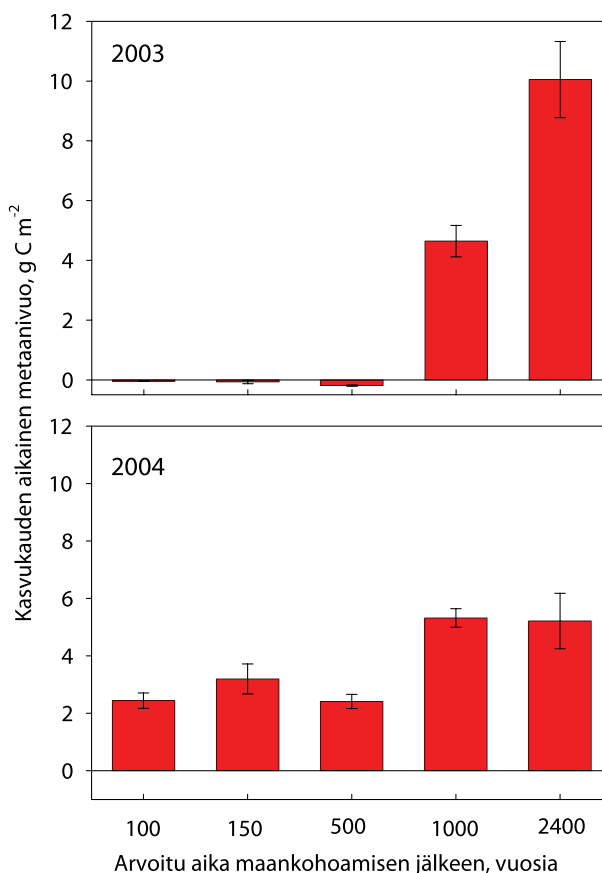


Kuva 23. Kasvukauden aikainen CO₂:n vaihto viidellä eri-ikäisellä luonnontilaisella suolla maankohoa-misrannikolla. Ylhäällä: Fotosynteesi. Keskellä: Ekosysteemin respiraatio. Alhaalla: Ekosysteemin hiilikaasun-vaihto. Kasvillisuus on sitonut hiiltä enemmän kuin alalta on vapautunut.

vikauden aikaiseksi CO₂:n hävikiksi arvioidaan noin 44 g C m⁻² ja metaanin 5 g C m⁻², alojen vuotuisesti hiilitaseeksi jää -258–86 g C m⁻², eli keskimäärin viisikymmenvuotiaalta alalta poistui vuositain hiiltä ilmakehään 17 g C m⁻².

Luonnontilaisten soiden ikäsarja

Maankohoamisrannikon nuorimmat alat olivat heinien ja sarojen vallitsevia rantaluhtia, jossa samalia kasvoi vain harvakseltaan. Kaksi keski-ikäistä alaa, 500- ja 1000-vuotiaat, olivat saranevoja, joiden sammalkerros oli jo täysin sulkeutunut. Vanhin aloista oli saranevan ja rahkasuon vaihettuma, jolla kasvoi sarojen lisäksi sukkession loppuvaiheen lajistoa. Turvekerroksen paksuus oli kolmella vanhimmalla suolla keskimäärin noin 50, 75 ja 180 cm.



Kuva 24. Kasvukauden aikainen CH₄-virta viidellä eri-ikäisellä suolla maankohoamisrannikolla kahtena eri mitausvuonna. Positiiviset luvut kertovat CH₄-virrasta ilmakehään, negatiiviset taas nettovuosta ilmakehästä ekosysteemiin.

Kasvukauden aikainen nettohiilensidonta oli suurimmillaan nuorimmalla rantaluhdalla ja väheni kohti vanhempaa 1000-vuotiaista saranevaa (Kuva 23). Vanhimmalla alalla, jossa sara- ja rahkasuon kasvillisuus muodostivat vaihettuman, hiilensidonta oli taas suurempaa. Erot ikäsarjalla syntyivät eroista fotosynteesitehokkuudessa, sillä ekosysteemin respiraatio ei paljonkaan eronnut soiden välillä. Nuorempien alojen nettovaihto oli samaa suuruusluokkaa tai suurempi kuin 10-vuotiaan ennallistamiskohteen (Kuvat 21 ja 23). Vanhemman sarasuon nettovaihto taas oli samaa suuruusluokkaa kuin 50-vuotiailla turpeennostoaloilla (Kuvat 21 ja 22).

Ikäsarjan CH₄-päästöissä oli suurta vaihtelua (Kuva 24). Kuivana vuonna 2003 kolme nuorinta suota toimi pienenä CH₄-nieluna, kun taas seuraavana sateisempänä kesänä niiltä vapautui CH₄:a ilmakehään. Kaksi vanhinta olivat CH₄:n lähteitä molempina vuosina. CH₄-virrat olivat ikäsarjalta samaa suuruusluokkaa tai pienempiä kuin kymmenvuotiaalta ennallistamiskohteelta mitatut (Kuvat 21 ja 24).

3.6.4. Johtopäätökset

- Tähän mennessä Suomessa on tutkittu suon hiilidynamiikan ennallistumiskehitystä turvetuotannon jälkeen yhdellä ennallistetulla jyrsturvekentällä ja yhdellä kohteella, jossa laahakauhaneetelmällä tehty turpeen nosto on lopetettu viisikymmentä vuotta aiemmin. Ensimmäisellä alalla tutkimus kattaa varsin hyvin koko kymmenen vuoden soistumiskehityshistorian ja on pisin ole-massa oleva seurantajakso maailmassa. Toiselta kohteelta on tehty kasvukauden aikaisia mitta-uksia kahdelta vuodelta.
- Kahdelta soistamiskohteelta saadut tulokset viittaavat siihen, että hiilen sidonta elpyy nopeasti suokasvillisuuden tulon myötä. Aluksi hiilinielu vaikuttaa olevan hyvin tehokas, erityisesti koska fotosynteesi on suurta ja hapettoman hajotuksen lopputuotteena syntyvää metaania vapautuu vähän.
- Merkittävin tekijä soistamisen onnistumisessa on maan riittävä kosteus. Suotuisissa oloissa hii-len kertyminen saattaa olla erittäin nopeaa kunnes syntyvä uusi orgaaninen aines lähestyy altaan reunoja ja allas alkaa täyttyä. Ajan myötä hiilidioksidin sidonta voi hidastua ja metaaninvapautu-miseen johtavat prosessit vakautuvat niin, että metaanivuot asettuvat luonnontilaisten soiden tasolle. Lyhyt seuranta-aika aiheuttaa laskelmiin kuitenkin epävarmuutta. Toisaalta tulokset ikä-sarjalta, jossa suon kehitystä tutkittiin satavuotiaasta suolusta noin 2500-vuotiaaseen rahka-suohon, tukevat näitä päätelmiä, jotka pohjautuvat kymmen- ja viisikymmenvuotiaan soistamis-alan vertailuun. Myös ikäsarjalla bruttofotosynteesi oli tehokkaimmillaan nuorimmilla aloilla ja hidastui suon iän kasvaessa. Samoin metaanidynamiikka oli epävakainta nuorimmilla soilla, kun taas vanhimmat suot toimivat tasaisina metaanin lähteinä. Luonnontilaisella ikäsarjalla soistu-misprosessi oli paljon hitaampi kuin ihmisen säätelillä soistetuilla suonpohjilla, joissa kuivuus rajoittaa kehitystä.
- Vakiintuneen suokasvillisuuden muodostumisen jälkeen soistettu suonpohja toimi kuten luonnontilainen suo. Suokasvillisuuden vallitsevat pinnat toimivat hiilen nieluina ja metaanin lähteinä. Koska nettovaihdon ja suokasvillisuuden määrän ja luonteen välillä on selkeä vahva yhteys, kas-villisuutta voitaisiin käyttää yksinkertaisena tunnuksena soistetun suonpohjan hiilitaseen ja metaanipäästöjen arviointiin.
- Jos soistumiskehitystä halutaan nopeuttaa tuomalla alalle sammalia ja putkilokasvien leviäimiä, kuten jo laajassa mittakaavassa tehdään Kanadassa, on olennaista tuoda paikalle valikoima eko-logialtaan erilaisia lajeja, jotta kullekin paikalle saadaan heti sillä parhaiten toimiva lajiyhteisö. Useamman lajin yhteisö näyttää kykenevän suurempaan hiilensidontaan kuin yhden lajin vallitse-ma kasvusto.
- Luonnontilaisten soiden kasvihuonevaikutusta, joka ei suoraan ole ihmisen toiminnan syytä tai ansioita, ei sisällytetä kasvihuonekaasuinventarioon. Toisin kuin luonnontilaiset suot, soistetut suonpohjat kuuluvat raportoitaviin maankäyttöluokkiin, vaikka niiden maankäytöllä pyritään pois-tamaan ihmisen toiminnan vaikutus ja palauttamaan luonnontilaista vastaava tilanne. Olisi luon-tevaa siirtää soistetut suonpohjat pois raportoinnista luonnontilaisten soiden luokkaan tietyn mää-räajan kuluttua kun niiden kasvillisuus on saavuttanut riittävän peittävyuden, kuten esim. puolet soistetun suonpohjan pinta-alasta.

4. Soiden maankäytön päästökertoimet, epävarmuustarkastelu ja jatkotutkimustarpeet

Jukka Alm, Narasinha J. Shurpali, Kari Minkkinen, Jukka Laine

4.1. Tausta

Suomen soihin jääkauden jälkeen sitoutuneiden hiili- ja typpivarojen mobilisoituminen maankäytön seurauksena aiheuttaa kasvihuonekaasujen hiilidioksidin, metaanin ja typpioksiduulin päästöjä. Turvemaat on äsken nimetty erääksi keskeisistä maaperätyypeistä EU:n COST 639 -hankkeen määrittelyssä. Suuri eloperäisen aineksen määrä ja turpeen hajotusprosessien ja hiilen sekä typen kiertojen herkkyys ilmastoon säätelyvaikutukselle ovat keskeinen peruste tälle huomiolle.

YK:n ilmastopöytäkirjan allekirjoittajamaana Suomella on velvollisuus raportoida maankäyttöön liittyvät kasvihuonekaasujen päästöt. Turvemailla erityisesti maaperän hiili- ja typpivaraston muutosten seuraaminen maankäyttötavan muuttuessa on erittäin vaikeaa, sillä ainevirrat ovat pieniä suhteessa itse varaston kokoon. Varastomuutosten sijasta turvemailla voidaan IPCC:n ohjeiden mukaan raportoida kasvihuonekaasujen vaihto ekosysteemin ja ilmakehän välillä.

Suomalaisen ilmakehän tutkimusohjelman (SILMU) päättyessä 1990-luvun puolivälissä suontutkimukseen paneutuneet tutkijaryhmät eri organisaatioissa olivat jo kehittäneet kaasuvirtojen tutkimuksessa tarvittavat metodit ja tavan toimia yhteistyössä. Tällöin luotiin pohja luonnontilaisten ja varsinkin metsäoitettujen soiden ja ilmakehän kaasunvaihdon tutkimukselle. Silmun jälkeen kaasututkimus laajeni pohjoisen palsasoille, suo-
pöytäkirjan allekirjoittajamaana Suomella on velvollisuus raportoida maankäyttöön liittyvät kasvihuonekaasujen päästöt. Turvemailla erityisesti maaperän hiili- ja typpivaraston muutosten seuraaminen maankäyttötavan muuttuessa on erittäin vaikeaa, sillä ainevirrat ovat pieniä suhteessa itse varaston kokoon. Varastomuutosten sijasta turvemailla voidaan IPCC:n ohjeiden mukaan raportoida kasvihuonekaasujen vaihto ekosysteemin ja ilmakehän välillä.

Suomalaisen ilmakehän tutkimusohjelman (SILMU) päättyessä 1990-luvun puolivälissä suontutkimukseen paneutuneet tutkijaryhmät eri organisaatioissa olivat jo kehittäneet kaasuvirtojen tutkimuksessa tarvittavat metodit ja tavan toimia yhteistyössä. Tällöin luotiin pohja luonnontilaisten ja varsinkin metsäoitettujen soiden ja ilmakehän kaasunvaihdon tutkimukselle. Silmun jälkeen kaasututkimus laajeni pohjoisen palsasoille, suo-
pöytäkirjan allekirjoittajamaana Suomella on velvollisuus raportoida maankäyttöön liittyvät kasvihuonekaasujen päästöt. Turvemailla erityisesti maaperän hiili- ja typpivaraston muutosten seuraaminen maankäyttötavan muuttuessa on erittäin vaikeaa, sillä ainevirrat ovat pieniä suhteessa itse varaston kokoon. Varastomuutosten sijasta turvemailla voidaan IPCC:n ohjeiden mukaan raportoida kasvihuonekaasujen vaihto ekosysteemin ja ilmakehän välillä.

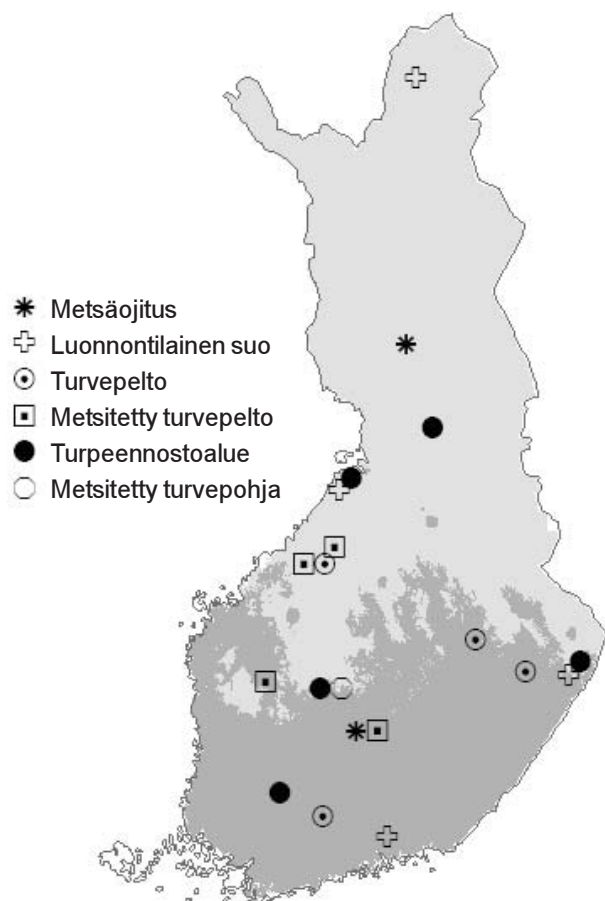
Ekosysteemin kokonaispäästöjen suuruus riippuu kunkin kaasun osalta ekosysteemin kasvillisuudesta, turpeen kuivatusasteesta, ravinnetilanteesta ja alueen ilmastoon liittyvistä tekijöistä. Vaikka tutkimusohjelman aikana voitiin täydentää merkittäviä aukkoja eri maankäyttömuotoihin liittyvissä päästötiedoissa, tulosten maantieteellinen yleistettävyyden osoittautui luultua ongelmallisemmaksi.

4.2. Aineisto ja menetelmät

Kaasunvaihtoa tutkittiin sulan maan kaudella kammiomenetelmällä. Tässä menetelmässä pintaturpeeseen asennetun kaasutiivin kauluksen päälle asetetaan ilmatiiviisti kammio, joka sulkee sisään myös pintakasvillisuuden. Kammion ilmatilan kaasupitoisuuksista otetaan näytteitä joiden kaasupitoisuus määritetään myöhemmin kaasukromatografialla. Hiilidioksidi voidaan yleensä määrittää jo maastossa. Läpinäkyvän kammion avulla mitataan vallitsevassa valossa ja lämpötilassa ekosysteemin hiilen nettovaihto. Läpinäkymätön kammio paljastaa ekosysteemin kokonaishengityksen ja sen avulla mitattiin myös CH_4 - ja N_2O -virrat. Metsäisillä kohteilla elävien kasvien hengitys erotettiin maahengityksestä pitämällä kauluksen alue kasvittomana. Myös uuden karikkeen kertyminen puista ja pintakasvillisuudesta estettiin suojaamalla kaulus verkolla. Talvella kaasuvirtoja määritettiin ottamalla kaasunäytteet hangen alta ja yläpuolelta ja arvioimalla kaasuvirta diffuusiona huokoisen aineen läpi. Hangen huokoisuus määritettiin gravimetrisesti. Tutkimusohjelman tarpeisiin käytettyjen koealojen sijainti on esitetty kuvassa 25.

Päästökertoimien alueellista laskentaa varten kehitettiin säätilastoihin perustuva simulointikoneisto, johon kuului sääsimulaattori ja tietokantarakenne alueellisen tutkimustiedon ja taustamuut-
Päästökertoimien alueellista laskentaa varten kehitettiin säätilastoihin perustuva simulointikoneisto, johon kuului sääsimulaattori ja tietokantarakenne alueellisen tutkimustiedon ja taustamuut-

Metsämailla (suot ja kivennäismaat) tieto hiilen syötöstä ekosysteemiin tuotetaan Metlan alueellisessa kasvihuonekaasujen laskennassa Valtakunnan metsien inventoinnissa kerätyn maastotiedon



Kuva 25. Ohjelman aikana tutkitut koealueet eri maankäyttömuodoittain Suomessa. Tummempi harmaan sävy erottaa yli 1 100 dd lämpösummavyöhykkeen laskettuna jakson 1961–1990 säätilastoista.

avulla. Maastotiedoista generoidaan vuotuinen metsikkötason karikkekertymä maan päälle ja juuristoon, ja hajotusmallin avulla lasketaan karikkeesta jäljelle jäävät osuudet. Päästökerrointaulukon avulla arvioidaan kullekin ojitusalueen turvekangastypille tyypillinen vanhan karikkeen ja turvekerroksen hajotusnopeus eri kaasuina. Esimerkkejä erilaisten turvekankaiden sidonta- ja päästöluvuista on esitetty luvussa 3.2.3. (Kuva 9).

4.3. Päästökertoimiin vaikuttavia tekijöitä eri turvemailla

Määrällisesti tärkein kasvihuonekaasuvirta on metsäojitettujen soiden maan orgaanisen aineksen (karike ja turve) hapettuessa emittoituva CO_2 . Vanhan karikkeen hapettuminen on suurinta runsasravinteisilla metsätyypeillä kuten ruohoturvekankailla ja pienintä niukkaravinteisimmilla metsätyypeillä, kuten varpu- ja puolukkaturvekankailla (Taulukko 4). Suurin osa ojitusalueiden suomet-sistämme sijoittuu karuihin ja keskiravinteisiin turvekangastyppeihin.

Maahengityksen riippuvuus lämpötilasta ja turpeen kosteudesta antaa mahdollisuuden mallittaa vuotuisia päästöjä yksinkertaisesti säätekijöiden vuorokausivaihteluun nojautuen. Tähän perustuvat kunkin koealan vuotuisen CO_2 -päästöjen arviot.

Taulukko 4. Kasvihuonekaasujen (KHK) vuotuisia päästöjä metsäojitettujen soiden maaperästä turvekangasvaiheen eri kasvupaikkatyypeillä (ks. Martikainen ym. 1993, Minkkinen ym. 2007a ja Minkkinen ym. 2007b). CO_2 -päästöluku kuvaa pelkästään orgaanisen aineen hajotuksessa vapautuvaa CO_2 :a (=maahengitys), eikä ota huomioon kariketuotoksessa maahan sitoutuvaa hiiltä (vrt. kuva 9). Etelä ja pohjoinen viittaavat Kuvan 1 lämpösummavyöhykkeisiin. Ei määritetty = N.D. Yhteenlaskettu CO_2 -ekvivalentti on laskettu käyttäen 100 vuoden muuntokerrointa ($\text{GWP}[\text{CH}_4] = 23$; $\text{GWP}[\text{N}_2\text{O}] = 296$, Watson ym. 2001). Negatiiviset arvot tarkoittavat aineen nettosidontaa ilmakehästä ekosysteemiin.

KHK	Vatkg	Ptkg	Mtkg	Rhtkg
CO_2 , $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$				
<i>Etelä</i>				
Keskimäärin	880	975	1 250	1 713
Min–Max	719–1 001	810–1 096	1 045–1 404	1 437–1 911
<i>Pohjoinen</i>				
Keskimäärin	N.D.	N.D.	1 749	N.D.
Min–Max			1 555–2 035	
CH_4 , $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$				
Keskimäärin	1.9	-0,27	0,21	-0,58
Min–Max	-0,3–3,5	-0,82–0,28	-0,20–0,87	-0,73– -0,39
N_2O , $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$				
Keskimäärin	0,009	0,13	0,37	0,56
Min–Max	0–0,018	0,06–0,21	0,17–0,82	0,30–0,81
CO_2 -ekv. $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$				
Yhteensä	926	1 007	1 614	1 865

Oletimme, että samantyyppisten soiden maahengitys olisi samankaltaista suhteessa lämpötilaan eri puolilla maata. Havainnot joidenkin pohjoisten metsäojitettujen soiden sekä turpeennostoalueiden eteläisiä alueita voimakkaammasta maahengityksen lämpövasteesta lisäsivät kuitenkin epävarmuutta turpeen CO₂-poistuman mallittamiseen. Päästökertoimina joudutaan käyttämään koealoille (Kuva 25) laskettujen vuosipäästöjen keskiarvoja. Suunniteltu alueellisen säähavaintoaineiston hyödyntäminen alueellisesti tarkempien päästökertoimien tuottamisessa joutuu vielä odottamaan perusteluja paremman kattavuuden maahengitysmittauksista.

Ojitetuilla soilla muodostuu myös metaania, jos pohjaveden pinta on korkealla, mutta suurimillaankin vuotuinen CH₄-päästö vähäpuustoisilla karuilla ojitusalueilla jää mittausten mukaan alle luonnontilaisten kohosoiden tason. Tehokkaasti ojitetut ja metsittyneet turvekankaat ovat usein heikkoja CH₄-nieluja. Typpioksiduulia vapautuu merkittäviä määriä vain runsasravinteisilla tai typipilannoituilla turvekankailla. Metsäntutkimuslaitoksen keräämän alueellisen pintaturpeen hiili-typisuhteen perusteella arvioiden metsäojitettut suot voivat kuitenkin olla kokonaisuudessaan merkittävä N₂O:n lähde (3–4 Tg CO₂-ekv. a⁻¹), ja noin puolet päästöistä on alustavien laskelmien mukaan peräisin runsaspuustoisilta korpisoilta (ks. luku 3.2., kuva 11).

Uusi tutkimus on vahvistanut ja tarkentanut tiedot maatalouskäytössä olevien soiden merkittävistä CO₂- ja N₂O-päästöistä. N₂O-molekyylin kasvihuonevaikutus ilmakehässä on metaanin tapaan tarkasteltuna yhteen CO₂-molekyylin verrattuna jopa

296-kertainen, 100 vuoden aikajänteellä (GWP₁₀₀). N₂O-päästöjen syynä ovat paitsi turpeen luonnostaankin suuret hiili- ja typpivarat, erityisesti lannoituksen typpilisäys. Vaikka päästöt ovat herkkiä sääolosuhteille, säätelijöiden vaihtelulla kyetään suoraan ennustamaan vain pieni osa päästöistä. Lauhkean vyöhykkeen kaasunvaihtotutkimuksiin perustuvien prosessimallien sovittaminen havumetsävyöhykkeen ilmasto-oloihin on vaativaa. N₂O-päästöistä uusien havaintojen mukaan jopa 25–60 % ajoittuu talvikauteen. Talvipäästön biofykkaalisia mekanismeja kuitenkin vasta tutkitaan. Lupaavimpien mallien kehittäminen on jo aloitettu kansainvälisenä yhteistyönä. Metaanin osalta turvepelletit ovat heikkoja sitoja, sillä pohjaveden pinta pysyttelee turvepelloilla varsin syvällä, tai heikkoja päästölähteitä silloin kun turve kastuu ja sen happipitoisuus alenee.

Viljeltyjen turvepeltojen osalta on huomattava myös että tuotettu ja pelloilta viety sato muuttuu kulutuksen myötä pian hiilidioksidiksi ja osa siitä jopa metaaniksi, kuten rehulle lehmän pötsissä tapahtuu. Viljelyksestä jääneillä ns. pelloheitoilla kaasupäästöt näyttäisivät jatkuvan lähes samansuuruisina vielä vuosikymmeniä viljelyn päätyttyäkin (Taulukko 5).

Suopeltojen ja turvetuotannosta jääneiden suonpohjien metsittämisen on arvioitu pienentävän kasvihuonevaikutusta ja uudet tulokset näyttävät tukevan tätä arviota. Esimerkiksi metsitetylle pelloille istutettu nopean kasvun vaiheessa oleva 30-vuotias mäntymetsikkö osoitti vain vähäistä CO₂-nettopäästöä, 50 g CO₂ m⁻² a⁻¹ tutkimusvuoden 2002–2003 aikana.

Taulukko 5. Suopeltojen vuotuiset KHK-päästöt. Minimi- ja maksimiluvut edustavat kullakin viljelystyyppillä havaittuja arvoja. Yhteenlaskettu CO₂-ekvivalentti on laskettu käyttäen 100 vuoden muuntokerrointa (GWP[CH₄] = 23; GWP[N₂O] = 296, Watson ym. 2001). Negatiiviset arvot tarkoittavat aineen nettosidontaa ilmakehästä ekosysteemiin.

KHK	Nurmi	Vilja	Kynnös	Viljelemätön	keskimäärin
CO ₂ , g m ⁻² a ⁻¹					
Keskimäärin	2 072	1 485	1 760	2 971	1 188
Min–Max	290–4 033			2 167–4 033	–3 630
CH ₄ , g m ⁻² a ⁻¹					
Keskimäärin	0,42	1,27	–0,43	0,41	–0,22
Min–Max	–0,49–0,91	0,11–0,91	–0,49–0,51	–0,35–4,00	
N ₂ O, g m ⁻² a ⁻¹					
Keskimäärin	1,74	0,85	1,74	2,63	1,29
Min–Max	0,17–5,81	0,17–1,56	0,85–3,79	0,60–5,81	
CO ₂ -ekv. g m ⁻² a ⁻¹					
Yhteensä	2 597	1 766	2 265	3 759	1 565

Taulukko 6. Vuotuiset KHK-päästöt turpeen ja yli vuoden ikäisen karikkeen hajotuksesta metsitetyillä pelloilla ja turvepohjilla (ei huomioitu kariketuotoksessa maahan sitoutuvaa hiiltä). Yhteenlaskettu CO₂-ekvivalentti on laskettu käyttäen 100 vuoden muuntokerrointa (GWP[CH₄] = 23; GWP[N₂O] = 296, Watson ym. 2001). Negatiiviset arvot tarkoittavat aineen nettosidontaa ilmakehästä ekosysteemiin.

KHK	Metsitetyt viljelysmaat	Metsitetyt turvepohjat
CO ₂ , g m ⁻² a ⁻¹		
Keskimäärin	1 354	1 397
Min–Max	759–1 976	1 008–1 756
CH ₄ , g m ⁻² a ⁻¹		
Keskimäärin	–0,15	–0,05
Min–Max	–0,43–0,81	–0,09– –0,03
N ₂ O, g m ⁻² a ⁻¹		
Keskimäärin	1,02	0,15
Min–Max	0,16–4,71	0,02–0,75
CO ₂ -ekv.g m ⁻² a ⁻¹		
Yhteensä	1 652	1 438

Tulokset osoittavat kuitenkin, että maaperän päästöt eivät vähene niin paljoa, että puustoon sitoutuva hiilimäärä välttämättä muuttaisi kokonaistaseen positiiviseksi. Samaan aikaan metsitetyt turvepelot näyttävät päästävän N₂O:a (Taulukko 6).

4.4. Turpeennoston kaasupäästöt ja turvepohjien jatkokäyttö

Turpeennostoalueiden ja varastoauomojen kaasupäästöistä saatiin tutkimusohjelman aikana uutta tietoa. Suurin osa mitatuista kaasuvirroista oli samaa suuruusluokkaa kuin harvat aiemmin saadut tulokset (Taulukko 7), mutta yllättäviäkin havaintoja kertyi. Jo aiemmin mainittu pohjoisen turvekentän CO₂-päästön poikkeava lämpöriippuvuus saattoi näkyä Pudasjärveläisellä koealalla, mutta kahden toisiaan seuranneen erikoisen lämpimän ja kostean vuoden 2004–2005 mittaukset Kihniön Aitonevalla tuottivat suurimman yllätyksen. Poikkeavien olosuhteiden vallitessa turvekentältä voi vapautua erityisen paljon CO₂:a (Kuva 26)

Metsitetyillä turpeennostoalueilla hiilidioksidin vuotuinen päästö turpeen ja vanhan karikkeen hajotessa oli samaa suuruusluokkaa tai jopa suurempi kuin metsäojitusalueilla. Kun maaperän CO₂-päästöstä vähennetään puustoon vuosittain sitoutuva hiili, olettaen vuosikasvuksi 46–329 g m⁻² hiiltä, jäänee koko ekosysteemin hiilidioksiditase silti positiiviseksi. Metsittäminen kuitenkin hidastaa

Taulukko 7. Vuotuiset KHK-päästöt jyrsinturvekentiltä ja varastoauomoista (ks. Ahlholm & Silvola 1990, Nykänen ym. 1996 sekä Kari Minkkinen ja Niko Silvan, Tutkimusohjelma). Kesäkauden (touko–lokakuu) ja talvikauden (marras–huhtikuu) päästöt on eroteltu. Yhteenlaskettu CO₂-ekvivalentti on laskettu käyttäen 100 vuoden muuntokerrointa (GWP[CH₄] = 23; GWP[N₂O] = 296, Watson ym. 2001). *) Vuosimaksimissa on mukana Kihniön Aitonevalla mitattu erityisen kostea ja lämmin kesä 2005, jota ei ole huomioitu simuloidun vuosikeskiarvon^{a)} laskennassa.

KHK	Turpeen-nostoalueet	Varasto-aumat
CO ₂ , g m ⁻² a ⁻¹		
Keskimäärin (kesä)	663	15 260
Keskimäärin (talvi)	278	25 074
Koko vuosi	695–4 101 ^{*)}	
^a Simuloitu		
Tampere	980 ^b	
Oulu	945 ^b	
CH ₄ , g m ⁻² a ⁻¹		
Keskimäärin (kesä)	6,06 b	0,56
Min–Max	0,32–9,09	0,08–6,38
Keskimäärin (talvi)	1,17	38,61
Koko vuosi	7,23	19,48
N ₂ O, g m ⁻² a ⁻¹		
Keskimäärin (kesä)	0,26 b	0,34
Min–Max	0,06–0,50	0,20–0,48
Keskimäärin (talvi)	0,05	0,08
Koko vuosi	0,31	0,42
CO ₂ -ekv. g m ⁻² a ⁻¹		
Yhteensä	1 179	15 772 ^c
		769 ^d
		1 299 ^e

^a Simuloidut päästöt perustuvat yhteiseen lämpötilan vastefunktion.

^b Ojapäästöt lisätty Nykänen ym. (1996) mukaisesti.

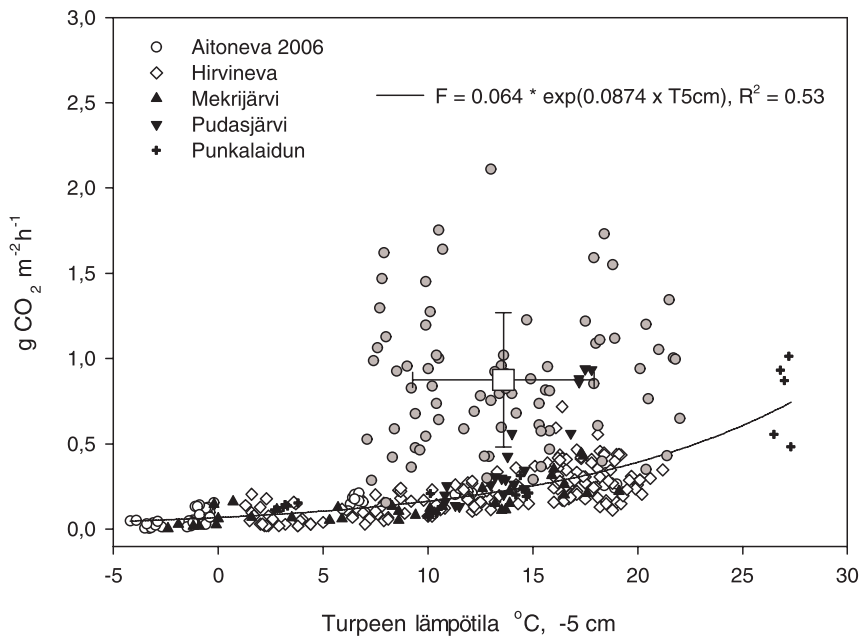
^c Kesäkauden ja talvikauden päästöjen keskiarvo olettaen että varastoauumat ovat olemassa koko vuoden.

^d Olettaen 10 % ala turvekentästä varatun varastoauomoille, ja että aumat ovat olemassa kesäkauden 6 kk.

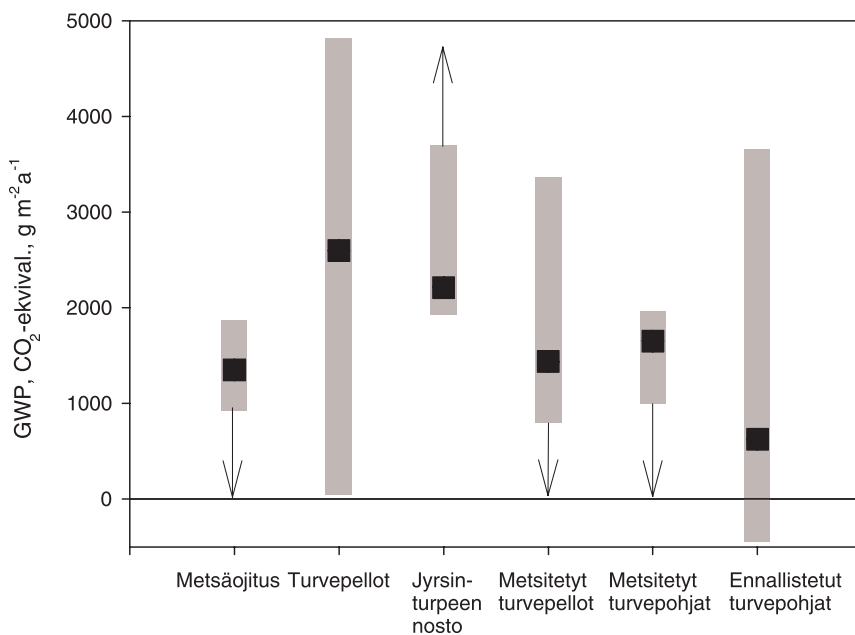
^e Olettaen 10 % ala turvekentästä varatun varastoauomoille, ja että aumat ovat olemassa talvikauden 6 kk.

hiilipäästöjä ainakin muutaman vuosikymmenen ajan puuston ja maanalaisen biomassan vielä kasvaessa (Kuva 27).

Suonpohjien ennallistaminen eli soistaminen turvetuotannon jatkokäyttömuotona sitoo CO₂:a pitkäaikaiseen varastoon, mutta seurauksena on myös CH₄-päästöjen käynnistyminen uudelleen uuden suon kehityksen myötä. Hiilen nettosidonta



Kuva 26. Valkoiset ja mustat symbolit edustavat CO₂-mittauksia eri jyrshinturvekentillä Suomessa. Nämä mittaukset ovat mukana regressiomallissa jossa maahengitystä selitetään turpeen lämpötilalla 5 cm syvyydessä. Harmaat symbolit ovat mittauksia erityisen lämpimänä ja kosteana kesänä 2005 Kihniön Aitonevalla. Avoin iso neliö ja virherajat kuvaavat CO₂-vuon keskiarvoa (0,88 g m⁻² h⁻¹) ja keskilämpötilaa (13,6 °C) 5 cm syvyydessä ja molempien muuttujien keskiarvontaa. Nämä muista poikkeavat mittaukset eivät ole mukana turvekenttien CO₂-päästön yhteisessä siirtofunktiomallissa.



Kuva 27. Maaperän KHK-päästöjen yhteenvedo CO₂-ekvivalentteina eri turvemaan käyttötavoilla. Arvot on johdettu taulukoista 3 ja 5–7. Palkit kuvaavat havaittuja vaihteluvälejä kussakin maankäyttötavassa, musta neliö havaintojen keskiarvoa. Metsäojitusalueen päästöt riippuvat kasvu- ja paikkatyyppien jakaumasta Suomessa, eikä parasta estimaattia voida antaa tässä. Alaspäin osoittavat nuolet kuvaavat ensimmäisen sukupolven puustoon, pinta- ja kasvillisuuteen sekä vielä hajomattomaan karikkeeseen sitoutuvan hiilen ilmakehän lämpenemistä alentavaa vaikutusta. Ylöspäin osoittava nuoli ilmaisee mahdollisten lämpimien ja kosteiden olosuhteiden ilmakehää lämmittävää vaikutusta lisääntyvien CO₂- ja CH₄-päästöjen vaikutuksesta jyrshinturvekentillä ja varastoauomoissa (Taulukko 7).

alkaa soistamisaloilla jo muutamassa vuodessa kun vedenpinta pidetään pintaturpeen tasalla. CH₄-päästöt seuraavat viiveellä uuden orgaanisen aineksen sidontaa. Jos tilannetta verrataan soistamisen tavoitteena olevaan luonnontilaiseen sara-suohon, havaitaan että soistuvan alueen CH₄-päästö voi olla aluksi ainakin useiden vuosien ajan vähäisempää kuin sarasoilla. Erityisen nopeasti uutta kasvibiomassaa kerryttävä soistamisalue voi kuitenkin sopivissa oloissa tuottaa poikkeuksellisen suuren vuotuisen CH₄-päästön: yli 30 g CH₄ m⁻². Tällaisenkin ekosysteemin toiminta

voi tasoittua ja sekä turpeen kertymänopeus että CH₄-päästö alentua ajan myötä resurssien vähenemisessä. Soistamista olisikin perusteltua pitää vain tilapäisenä maankäytön muutoksena, ja ennallistettu suo voitaisiin ennen pitkää jättää KHK-inventoinnin ulkopuolelle, kuten luonnontilaiset suot.

4.5. Tulevaisuuden näkymät

Metsäojitettujen soiden turpeesta poistuvan CO₂:n määrä eri alueilla muodostaa yhden suurimmista

epävarmuuslähteistä maankäytön kasvihuonekaasupäästöjen inventoinnissa. Alueellinen tutkimushanke “*Metsäojitettujen soiden hiilitaseiden seurantarajestelmä – ennustaminen ja monitorointi muuttuvissa olosuhteissa*” on jo käynnistynyt Helsingin yliopiston ja Metlan yhteistyönä. Hankkeessa kootaan systemaattista kaasumittausaineistoa samoilta Valtakunnan metsien inventointi -koealoilta joista pintaturpeen laadusta ja kasvipeitteestä on jo saatavilla tietoja

Päästökertoimien ilmastoriippuvuus on tosiasia. Kun ilmasto muuttuu, nyt esitetyt staattiset päästökertoimet vanhenevat nopeasti. Sopivien mallien kehittäminen edellyttää vertailuaineistojen keräämistä sekä ympäristöolosuhteista että kaasuvirroista.

Maahengityksen tekijöiden, elävien kasvien hengityksen ja toisenvaraisten eliöiden tuottaman hiilidioksidin erottaminen on varsinkin turvemaidella haasteellista. Pysyvien ja radioaktiivisten hiilen isotooppien osuuksien analysointi eri karike- ja humusositteissa voi tuoda tähän lisätietoa. N₂O-virtojen toistaiseksi vaikea ennustettavuus ja sijoittuminen talvikaudelle tuo mallien kehittä-

seen haasteita.

Kasvihuonekaasujen päästöinventointiin liittyvät ongelmat koskevat koko Eurooppaa. Tämän johdosta tutkijoiden yhteistyötä parantavia COST-hankkeita ja integroituja hankkeita (mm. COST E21, E43, 639, Carbo-Europe IP, Nitro-Europe IP, BIOSOIL) on käynnistynyt viime vuosien kuluessa. Inventointimenetelmien harmonisointi edellyttää metodisten valmiuksien kehittämistä yhtä aikaa sekä uusissa että vanhoissa EU-maissa.

Monet suurista eurooppalaisista tutkimushankkeista keskittyvät lauhkean vyöhykkeen olosuhteisiin ja jättävät havumetsävyöhykkeen vähemmälle huomiolle. Pohjoisilla alueilla on runsaasti turvemaita; noin kolmannes EU-maiden soista sijaitsee Suomessa ja neljännes Ruotsissa. Turvemaiden käyttö on Suomessa merkittävää. Ensimmäiset arviot metsien hiilinielusta näyttävät suometsät kasvihuonekaasujen nettopäästäjinä ja ne osaltaan vähentävät metsien hiilinielua. Tämän vuoksi erityisesti Suomessa ja Ruotsissa tulisi koota voimia pohjoisten alueiden erityiskysymysten selvittämiseen.

4.6. Johtopäätökset

- Tässä tutkimusohjelmassa voitiin täydentää merkittäviä aukkoja eri maankäyttömuotoihin liittyvissä päästötiedoissa ja tarkentaa niiden päästökertoimia. Ekosysteemin hiilen kokonaispäästöjen suuruus riippuu kunkin kaasun osalta ekosysteemin kasvillisuuteen, turpeen kuivatusasteeseen, ravinnetilanteeseen ja alueen ilmastoon liittyvistä tekijöistä. Tulosten maantieteellinen yleistettävyys osoittautui luultua ongelmallisemmaksi.
- Maahengityksen lämpötilariippuvuus vaihtelee eri osissa maata, joka aiheuttaa epävarmuutta hiilidioksidipäästöjen ennusteisiin.
- Metsäojitetut suot ja turvepellot ovat pääsääntöisesti metaanin nieluja. Maa muuttuu päästölähteeksi silloin kun turve kastuu ja sen happipitoisuus alenee.
- Metsäojituksen merkitys typpioksiduulipäästöihin on merkittävä. Merkittävimpiä päästölähteitä ovat ravinteikkaat puustoiset korpisuot.
- Suopeltojen ja turvetuotannosta jääneiden suonpohjien metsittäminen vähentää kasvihuonekaasupäästöjä, mutta puusto ei kuitenkaan riitä muuttamaan kasvupaikkaa hiilen nieluksi.
- Turpeenostoalueiden kaasupäästöissä esiintyy suurta vuotuista vaihtelua. Suotuisten olosuhteiden, kuten kosteiden ja lämpimien sääolosuhteiden vallitessa, niiltä voi vapautua huomattavia määriä hiilidioksidia.
- Suonpohjien ennallistaminen turvetuotannon jatkokäyttömuotona sitoo hiilidioksidia pitkäaikaiseen varastoon, mutta seurauksena on myös metaanipäästöjen käynnistyminen uudelleen uuden suon kehityksen myötä. Myöhemmin turpeen kertyminen ja metaanipäästöt kuitenkin tasoittuvat. Ennallistamista olisi perusteltua pitää vain tilapäisenä maankäytön muutoksena, ja ennallistettu suo voitaisiin tietyn määräajan kuluttua jättää KHK-inventoinnin ulkopuolelle, kuten luonnontilaiset suot.

5. Polttoturpeen eri hyödyntämisketjujen ilmastovaikutus Suomessa elinkaarinäkökulmasta

Johanna Kirkinen, Ilkka Savolainen

5.1. Tausta ja tavoitteet

Turpe on kotimainen polttoaine, jolla on merkittävä asema Suomen energiantuotannossa. Turpeen osuus primäärisestä energiantuotannosta oli noin 6 % vuonna 2004. Turvetta käytetään erityisesti keskikokoisessa yhdistetyssä lämmön ja sähkön tuotannossa (CHP) niin teollisuuden kuin yhteiskunnan tarpeisiin. Turpe on myös tärkeä tukipolttoaine muiden biomassojen, varsinkin puun energiakäytössä. Turpeen kotimaisuuden tuomina etuina ovat energiaomavaraisuuden lisääntyminen sekä työllisyyden parantuminen. Suomi on merkittävästi riippuvainen tuontipolttoaineista kuten öljy, hiili ja maakaasu. Turpeen käytön voimakas lisääminen alkoi 1970-luvun öljykriisin jälkeen tuontipolttoaineiden riippuvaisuuden vähentämiseksi. Turpe on myös tärkeä työllisyyden lisääjä harvaan asutuilla alueilla, sillä turpeen tuotantoalueet sijaitsevat pääasiassa Keski- ja Pohjois-Suomessa.

Turpeen käytön haittana ovat sen aiheuttamat kasvihuonekaasujen päästöt, jotka ovat kasvaneet polttoturpeen käytön lisääntymisen myötä. Toisaalta taas turvetta muodostuu soillamme jatkuvasti vuosittain enemmän kuin sitä käytetään. Suomessa turpe luokitellaan hitaasti uusiutuvaksi biomassapolttolaineksi. Maat ovat velvollisia inventoimaan ja raportoimaan kasvihuonekaasupäästönsä ilmastopöytäkirjalle. Suomen kasvihuonekaasuinventaario ja päästökauppa rinnastavat turpeen fossiilisiin polttoaineisiin. Päästökaupan myötä turpeen tuotannon arvioidaan vähenevän erityisesti sähkön lauhdetuotannossa. Hallitusten välisen ilmastopaneelin (IPCC) uusissa ohjeissa (2006 Guidelines) turpeen aiheuttamien päästöjen raportoinnille on varattu oma luokka (IPCC 2006), mutta laskennassa turpe rinnastuu fossiilisiin polttoaineisiin.

Ilmastopöytäkirjalle raportoitavassa päästöinventaariossa pyritään mahdollisimman tarkasti esittämään raportoitavan maan ihmisen toiminnan aiheuttamat toteutuneet kasvihuonekaasujen päästöt ja nielut tarkasteluvuonna. Tämä nähdään tärkeänä, jotta voidaan seurata kasvihuonekaasujen päästöjen todellista kehitystä, ja jotta voidaan

arvioida Kioton pöytäkirjan velvoitteiden toteutumista. Elinkaaritarkastelussa sen sijaan yhdistetään päästöjen ja nielujen vaikutuksia pitkällä aikajänteellä.

Tämän tutkimuksen tavoitteina ovat 1) selvittää ilmastoystävällisin turpeen tuotantoketju, kun koko elinkaari huomioidaan (mille alueille turvetuotantoa tulisi suunnata ja mikä jälleenkäyttövaihtoehto on ilmastoystävällisin), 2) arvioida tulosten herkkyyttä ja epävarmuutta 3) verrata turpeen kasvihuonevaikutusta fossiilisiin polttoaineisiin (pääasiassa kivihiileen) ja 4) tuottaa mahdollista uutta tietoa turpe-energian päästöjen raportointiin. Lisäksi 5) selvitetään turvemaan hyödyntämisen tuotantoketjun kasvihuonevaikutus, kun turpeen tuotannon jälkeen alueella tuotetaan uusiutuvaa bioenergiaa (puubiomassaa tai ruokohelpeä).

5.2. Energiaturpeen elinkaaren kasvihuonevaikutuksen arvioiminen

Kasvihuonevaikutusta arvioidaan säteilypakotteella. Säteilypakote kuvaa kasvihuonekaasuista aiheutuvaa maapallon säteilyenergiatasapainon häiriötä, josta seuraa ilmaston muuttuminen. Säteilypakotteen laskemiseksi tarkastellaan turpeen energiakäytön aiheuttamia laskennallisia CO_2 :n, CH_4 :n ja N_2O :n pitoisuuksien muutoksia, jotka aiheutuvat turpeen energiakäyttöön liittyvistä päästöistä ja nieluista. Tulokset ilmaistaan joko yhtä PJ tuotettua energiaa kohden tai dimensiotomana yksikkönä ($E_{\text{abs}}/E_{\text{po}}$), joka kuvaa elinkaaren päästöjen ja nielujen aiheuttamaa kumulatiivista säteilypakotetta jaettuna polttoaineen energialla. Nämä esitystavat helpottavat eri turveketjujen ja kivihiilen käyttöketjun kasvihuonevaikutusten vertailua. Energiaturpeen elinkaaren kasvihuonevaikutusta tarkastellaan ilmakehän näkökulmasta. Kaasuvirrat ilmakehään ovat päästöjä ja kuvataan plus-merkkisinä, päästöt pois ilmakehästä ovat nieluja ja kuvataan miinus-merkkisinä. Elinkaarianalyysia käytetään tässä tutkimuksessa arvioidessa tarkasteltavan toiminnon/tuotteen "kehdestä hautaan" aiheuttamia ympäristövaikutuksia (tässä tutkimuksessa ilmastovaikutuksia), jotka sisältyvät elinkaareen luonnonvarojen käytöstä käyttövaiheen jälkeiseen jätteiden käsittelyyn (ISO 14040 1997), turpeen tapauksessa tuotantoalueen jatkokäyttöön.

Soilla on kasvihuonevaikutusta jo niiden luonnon-tilassa. Tämä tulee ottaa huomioon laskettaessa polttoturpeen hyödyntämisestä aiheutunutta kasvihuonevaikutusta, sillä kun alue otetaan turvetuo-



Luonnontilaista saranevaa Etelä-Suomessa (Kuva: Sakari Sarkkola).

tantoon, sen luonnontilaiset päästöt jäävät toteutumatta. Turvemaan hyödyntämisketjun kasvihuonevaikutus lasketaan täten vähentämällä tuotannon (turvetuotantokentän, auman ja työkoneiden päästöt) ja polton päästöt suon alkuperäisen tilan päästöistä/nieluista, jotka jäävät toteutumatta:

$$I = I_U - I_R, \quad (1)$$

missä I kuvaa nettokasvihuonevaikutusta, I_U on turpeen (ja biomassan) hyödyntämisketjun kasvihuonevaikutus ja I_R on luonnontilaisen suon (tai muun hyödynnetyn turvevaran) kasvihuonevaikutus (referenssitila).

5.3. Tarkasteltavat energiaturveketjut

Turve-energian tuotantoketju muodostuu kolmesta eri vaiheesta: alkutila, polttoturpeen tuotanto (turpeen tuottaminen ml. työkoneiden päästöt, varastoiminen ja kuljetus voimalaitokselle) ja polttaminen sekä turpeentuotantoalueen jälkikäsitteily. Tutkimuksessa käsitellään mahdollisina turpeen tuotantoalueina eli alkutiloina luonnonvaraista suoaluetta (sarasuo), metsäojitettua suota sekä maatalouskäytössä olevaa turvemaata (suopelto). Sarasuo valittiin tutkimuskohteeksi muihin luonnontilaisiin soihin (vrt. keidassuo) verrattuna paremman turvetuotantoon soveltuvuutensa vuoksi.

Sarasuota on myös yleisemmin hyödynnetty Suomessa turvetuotantoon kuin keidassoita. Noin 25 % turvetuotantoon otetuista alueista on ollut luonnontilaisia soita. Suurin osa polttoturpeen tuotantoalueista (n. 75 %) on kuitenkin aiemmin kuivattu metsätalouskäyttöön. Metsäojitettujen soiden suuren turvepotentiaalin vuoksi niiden kasvihuonevaikutuksen tutkiminen on tärkeää. Maatalouskäytössä olevaa suomaa (multa ja turve) on Suomessa noin 280 000 ha, joista turvetuotantoon soveltuvaa alaa on arvioitu olevan noin 67 000 ha. Suopeltojen päästöt ovat merkittäviä, joten niiden turvetuotantoon hyödyntämisen kasvihuonevaikutusta on perusteltua tutkia. Tällä hetkellä suopeltojen hyödyntäminen turvetuotantoon on vähäistä. Turpeen tuotannon ja polttamisen jälkeen tuotantoalueen pohjan jatkokäsittelyvaihtoehtoina ovat soistaminen, metsitys tai ruokohelven viljely. Metsitys ja ruokohelven viljely ovat erityisen kiinnostavia vaihtoehtoja, koska biomassan kasvu sitoo hiilidioksidia ja tuotettua biomassaa voidaan käyttää teollisuuden raaka-aineena tai energian lähteenä.

Työssä tarkastellaan 12:ta eri turvemaan hyödyntämisketjun kasvihuonevaikutusta (Taulukot 8–9). Taulukon 8 ketjuissa tarkastellaan vain turve-energian hyödyntämisen aiheuttamaa kasvihuonevaikutusta. Laskennan lähtöarvot perustuvat pääosin ”Turpeen ja turvemaiden KHK-vaikutukset -tutki-

Taulukko 8. Polttoturpeen vaihtoehtoiset tuotantoketjut. Ketjut 5 ja 6 kuvaavat uuden turpeennostomenetelmän tuotantoketjuja. Näissä ketjuissa huomioidaan vain turve-energia.

Ketju	Energiavara	Turpeen tuotanto	Jatkokäyttö	Vertailutila
1	Sarasuo	Turpeen tuotanto ja poltto	Soistaminen	Sarasuon normaali kehittyminen
2	Sarasuo	Turpeen tuotanto ja poltto	Metsitys	Sarasuon normaali kehittyminen
3	Metsäojitettu suo	Turpeen tuotanto ja poltto	Metsitys	Metsäojitetun suon normaali kehittyminen
4	Suopelto	Turpeen tuotanto ja poltto	Metsitys	Suopellon normaali kehittyminen
5 Visioketju A	Metsäojitettu suo	Kehittynyt turpeen tuotanto ja poltto	Metsitys	Metsäojitetun suon normaali kehittyminen
6 Visioketju B	Suopelto	Kehittynyt turpeen tuotanto ja poltto	Metsitys	Suopellon normaali kehittyminen

Taulukko 9. Turvemaan hyödyntämisketjut. Ketjuissa hyödynnetään sekä turve-energia, että tuotantoalueen jälki-käytössä syntyvä uusiutuva bioenergia (puubiomassa, ruokohelpi). Ketjut C ja F kuvaavat uuden turpeennostomenetelmän tuotantoketjuja.

Ketju	Energiavara	Energian tuotanto ja poltto	Jatkokäyttö	Turvemaan jatkokäytön hyödyntäminen	Vertailutila
A	Metsäojitettu suo	Normaali tuotanto (jyrsinturve) ja poltto	Metsitys	Puubiomassan energiakäyttö	Metsäojitetun suon normaali kehittyminen
B	Metsäojitettu suo	Normaali tuotanto (jyrsinturve) ja poltto	Ruokohelven viljely	Ruokohelven energiakäyttö	Metsäojitetun suon normaali kehittyminen
C	Metsäojitettu suo	Kehittynyt tuotanto (uusi turvetuotantomenetelmä) ja poltto	Metsitys	Puubiomassan energiakäyttö	Metsäojitetun suon normaali kehittyminen
D	Suopelto	Normaali tuotanto (jyrsinturve) ja poltto	Metsitys	Puubiomassan energiakäyttö	Suopellon normaali kehittyminen
E	Suopelto	Normaali tuotanto (jyrsinturve) ja poltto	Ruokohelven viljely	Ruokohelven energiakäyttö	Suopellon normaali kehittyminen
F	Suopelto	Kehittynyt tuotanto (uusi turvetuotantomenetelmä) ja poltto	Ruokohelven viljely	Ruokohelven energiakäyttö	Suopellon normaali kehittyminen

musohjelmassa tehtyihin mittauksiin ja asiantuntija-arvioihin (Taulukko 11).

Tuotantoketjujen vertailutiloina on alkuperäisen tilanteen säilyminen. Ketjut 1–4 nähdään kaikista yleisimpinä tai kuvaavat turve-energian kasvihuo-

nevaikutuksen eroja ketjujen välillä. Tarkastelemme myös kahta turpeen hyödyntämisen ns. visio-ketjua A ja B (nro 5 ja 6), jotka kuvaavat turpeen hyödyntämisen kasvihuonevaikutuksen alhaisinta mahdollista tasoa, joka saavutetaan käyttämällä uusia teknologioita ja suuntaamalla tuotantoa alu-

eille, jotka ovat tällä hetkellä kasvihuonekaasujen päästölähteitä (suopelto ja metsäojitettu suo).

Turvemaan hyödyntämistä tarkasteltiin myös kokonaisvaltaisemmin, jolloin huomioitiin sekä tuotettu polttoturve että jälkikäytössä (metsitys tai ruokohelven viljely) syntyneen uusiutuvan bioenergian hyödyntäminen (Taulukko 9). Näissä ketjuissa tuotanto suunnataan alueille, jotka ovat jo kasvihuonekaasujen päästölähteitä. Jälkikäyttövaihtoehtoina on metsitys tai ruokohelven viljely. Jälkikäytöstä saatu uusiutuva biomassa (puubiomassa, ruokohelpi) hyödynnetään energiantuotantoon. Myös uuden turvetuotantomenetelmän (UT) vaihtokutsia on tutkittu näissä ketjuissa.

5.4. Laskelmien lähtöarvot

Polttoturvet

Sarasuo on CO₂:n nielu ja CH₄:n päästölähde. Metsäojitettu suo on CO₂:n päästölähde lisääntyneen aerobisen turpeen hajoaminen vuoksi. Suopelto on merkittävä CO₂:n päästölähde sekä N₂O:n päästölähde mutta vaatimaton CH₄:n nielu. Turpeen tuotannossa syntyy CO₂- ja CH₄-päästöjä. Turve hajoaa tuotantokentillä ja aumoissa, mikä aiheuttaa CO₂-päästöjä. Myös työkoneet aiheuttavat CO₂-päästöjä. Turpeen poltto on kuitenkin turpeen hyödyntämisketjun merkittävin päästölähde. Polton CO₂-päästöt aiheuttavat 90 % koko hyödyntämisketjun päästöistä. Poltossa syntyy myös N₂O- ja CH₄-päästöjä. Turpeen poltossa syntyy myös N₂O- ja CH₄-päästöjä. Niissä ketjuissa, joissa huomioidaan turvemaan hyödyntäminen ensin turvetuotantoon ja sitten uusiutuvan bioenergian tuotantoon, huomioidaan myös bioenergian tuotannosta ja käytöstä syntyvät päästöt.

Turvetuotantoalueen jatkokäytössä soistamisella on samanlainen kasvihuonevaikutus kuin luonnon-tilaisella aapasuolla. Metsitys johtaa hiilen sitoutumiseen kasvavaan biomassa (lähinnä puustoon sekä maanpinnan ylä- ja alapuoliseen karikkeeseen). Turpeen tuotannossa yleensä jää tuotantoalueelle mm. suonpohjan epätasaisuuksien takia jäännösturvetta. Jäännösturpeen hajoaminen aiheuttaa merkittävän CO₂-päästölähteen, jonka on arvioitu vähenevän vähitellen, kun maaperän hiilivarasto pienenee ja orgaaninen aines muuttuu vaikeammin hajoavaksi. Tässä tutkimuksessa oletetaan, että jäännösturpeen määrä on noin 20 cm paksu kerros (vastaa 15 kg hiiltä neliömetriä kohti), joka vähenee eksponentiaalisesti 15 kg C m⁻²:sta 1,2 kg C m⁻² 300 vuodessa. Metsityksen oletetaan myös sitovan hiiltä kasvavaan puubiomassa, kunnes keskimääräinen hiilen

varasto metsän kiertoajan yli on saavutettu. Näin laskennassa ei huomioida 300 vuoden ajalla tapahtuvia puuston hiilivaraston muutoksia, vaan käytetään pitkän ajan keskiarvoa.

Tarkastelluissa ketjuissa, joissa jälkikäytössä syntynyt puubiomassa tai ruokohelpi käytetään myös energiaksi, huomioidaan tuotanto- ja käyttövaiheen päästöt. Ruokohelven viljelyssä huomioidaan maaperän päästöt, joista on erilaisia arvioita (maaperä on hiilen päästölähde, nielu tai hiilen virran suhteen neutraali).

Laskelmissa käytetään seuraavia oletuksia: Turpeen energiasisältö yhdellä hehtaarilla (ha) on 9 400 MWh, joka vastaa 3 380 MJ m⁻². Yhden petajoulen energian tuottamiseen tarvittava ala on tällöin noin 30 ha. Soiden luonnon-tilaiset päästöt ja nielut, tuotannon päästöt sekä turvetuotantoalueen pohjan jälleenkäsittelyn päästöt ja nielut on esitetty taulukossa 10. Keskiarvon lisäksi on esitetty ala- ja yläraja, joita käytetään herkkyy- ja epävarmuusarvioissa.

Visioketjujen (nro 5 ja 6) ja turvemaan hyödyntämisketjujen (ketjut C, F) laskelmissa oletamme, että uusi turpeen tuotantomenetelmä, ”biomassakuivuri”, vähentää merkittävästi tuotantoalueen ja aumojen päästöjä. Uudella menetelmällä saadaan tuotetuksi polttoturvetta lyhyessä ajassa koko suonpaksuudelta, minkä vuoksi tuotantoaika vähenee 20 vuodesta yhteen-kahteen vuoteen. Arvioimme, että tuotantoalueen päästöt ovat hyvin pieniä (laskemissa nolla) tavanomaiseen polttoturpeen tuotantoon verrattuna. Työkoneiden ja aumojen päästöt oletamme myös aiempaa alhaisemmiksi (työkoneet 0,5 CO₂ MJ⁻¹, aumat 0,74 g CO₂ MJ⁻¹) kehittyneemmän kone- ja varastointiteknologian vuoksi. Polton CH₄- ja N₂O-päästöjen arvioidaan olevan pienempiä parantuneen polttoteknologian myötä ja CO₂-päästökerroin on pienempi, koska turve on kuivempaa (kosteus 30 prosenttia tavanomaisen 45 % sijasta, mistä seuraa 3 % pienempi polton CO₂-päästökerroin). Turvetuotantoalueen jälkikäyttömuotona visioket-

Taulukko 10. Kivihiilen polton ja muiden kivihiilen elinkaaren vaiheiden aikana syntyvät kasvihuonekaasupäästöt.

KHK	Polton päästöt (g MJ ⁻¹)	Elinkaaren muut päästöt (g MJ ⁻¹)	Yhteensä (g MJ ⁻¹)
CO ₂	92,19	2,99	95,18
CH ₄	0,005	0,335	0,34
N ₂ O	0,002	0,00	0,002



Uudella turvetuotantomenetelmällä korjattua polttoturvetta kuivatuskentällä. Kuivatuksessa hyödynnetään aurinkoenergiaa (Kuva: Sakari Sarkkola).

juissa on metsitys, jossa jäännösturpeen määrän arvioidaan olevan hyvin pieni (laskelmissa nolla). Uudessa tuotantomenetelmässä ei käytännössä yhtään jäännösturvetta jätetä hajoamaan turvetuotantoalueen pohjalle. Metsittämiseksi jäännösturpeen vähäinen määrä voi kuitenkin aiheuttaa ongelmia, koska puuston hyvä tuotostaso edellyttää runsaasti typpeä, jota puut saavat jäännösturpeesta. Lisäksi suotuisan kuivatuksen järjestäminen uudella turvetuotantomenetelmällä korjatulle alueelle voi tuottaa ongelmia.

Kivihiili

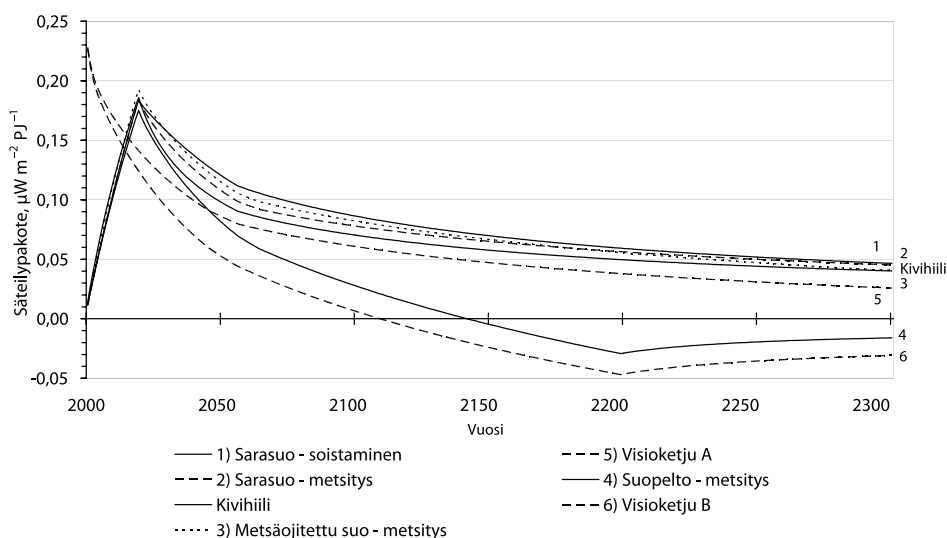
Kivihiilen ja turpeen kasvihuonevaikutuksien arvioimisessa käytetään yhtenäistä menetelmää, jolloin tulokset ovat vertailukelpoisia. Kivihiilen elinkaaren kasvihuonevaikutus lasketaan samoin kuin turpeen, eli huomioimalla kaikki elinkaaren vaiheet kivihiilen tuotannosta sen polttoon. Kivihiilen tuotantoketjun päästöt perustuvat EU:n *ExternE*-tutkimusohjelmaan. Tiedot polton päästöistä ovat Meri-Porin pölypolttolaitoksesta. Muiden elinkaaren vaiheiden päästöt muodostuvat pääasiassa kivihiilikaivosten metaanipäästöistä. Kivihiilikaivosten päästöt on arvioitu puolalaisille kaivoksille. Pieniä päästöjä aiheutuu myös tuotannossa ja kuljetuksessa tarvittavista työkoneista. Päästöluvut on esitelty taulukossa 10. Myös venäläisen kivihiilen hyödyntämisen kasvihuonevaikutusta arvioitiin.

Puolalaisen ja venäläisen kivihiilen kasvihuonevaikutukset ovat hyvin lähellä toisiaan (ks. Kirkinen ym. 2007).

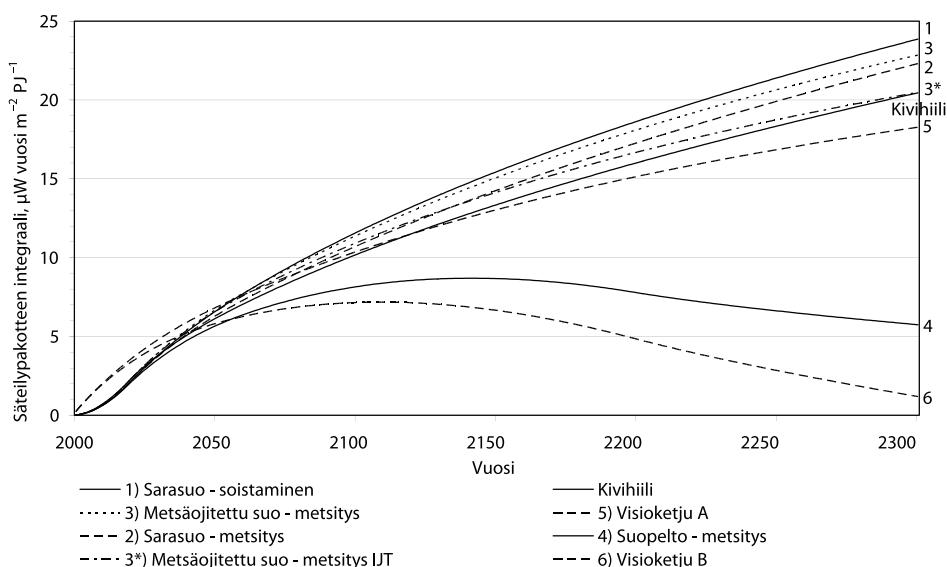
5.5. Tulokset

Polttoturpeen ja kivihiilen hyödyntämisketjujen hetkittäinen kasvihuonevaikutus esitetään ajan funktiona kuvassa 28. Näissä ketjuissa on huomioitu vain turve-energia. Käsiteltynä ajanjaksona on 300 vuotta. Kuvasta 29 nähdään, että turpeen tuotannon ja polton oletetaan tapahtuvan ensimmäisten 20 vuoden aikana, jolloin säteilypakote kasvaa voimakkaasti. Tämän jälkeen säteilypakote lähtee laskuun. Säteilypakotteen lasku johtuu pääasiassa hiilen globaalista kierrosta ja hiilen sitoutumisesta kasvavaan biomassaansa turpeentuotantoalueelle. Jos turpeen tuotanto tapahtuu luonnon-tilaiselta tai metsäojitetulta suolta, ei eri tuotantoketjujen välillä ole suuria eroja. Turvetuotantoketju *“aapasuo-soistaminen”* (1) tuottaa laskennallisesti suurimman kasvihuonevaikutuksen. Muiden turvetuotantoketjujen, kuten *“aapasuo-metsitys”* (2) ja *“metsäojitettu suo-metsitys”* (3) kasvihuonevaikutus on melkein sama. Suopeltojen eli maatalouskäytössä olleiden soiden kasvihuonevaikutus on selkeästi pienempi kuin minkään muun ketjun. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että suopeltojen hyödyntäminen turvetuotantoon lakkauttaa suopellon merkittävät päästöt.

Kuva 28. Eri turvetuotantoketjujen sekä hiilen tuotantoketjun aiheuttama hetkittäinen säteilypakote ajan funktiona. Säteilypakote esitetään maapallon pinta-alaa kohden.



Kuva 29. Eri turvetuotantoketjujen ja kivihiilen aiheuttama kumulatiivinen säteilypakote ajan funktiona tuotettua 1 PJ energia-määrää kohti. Säteilypakoteintegraali esitetään maapallon pinta-alaa kohden. Ketju 3* kuvaa tilannetta, jossa jäännösturve on kerätty pois kokonaan (ilman jäännösturvetta, IJT).



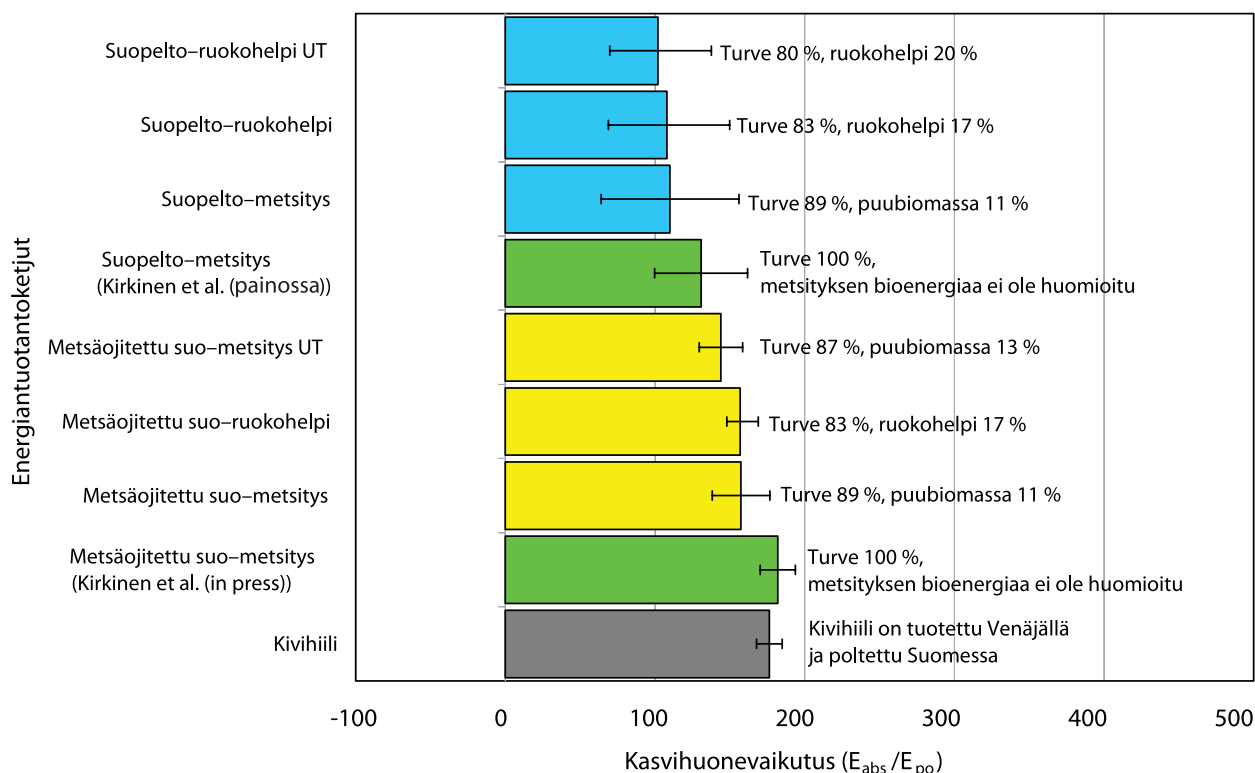
Polttoturpeen ja kivihiilen hyödyntämisketjujen kumulatiivinen kasvihuonevaikutus ajan funktiona 300 vuoden ajalta esitetään kuvassa 30. Tästä kuvasta voidaan lukea kokonaisilmastovaikutus tietyn tarkasteluajan kuluttua.

Myös metsäojitetun suon hyödyntäminen polttoturpeen tuotantoon aiheuttaa hieman suuremman kasvihuonevaikutuksen kuin kivihiili. Poikkeuksena on turvetuotantoketju, jossa turve tuotetaan metsäojitetulta suolta ja jälleenkäyttönä on metsitys, mutta laskelmissa oletetaan, että jäännösturvetta ei jää tuotantoalueelle (IJT=Ilman Jäännös-Turvetta). Keräämällä jäännösturve mahdollisimman tarkasti tämän ketjun kasvihuonevaikutus saadaan laskemaan kivihiilen kasvihuonevaikutuksen tasolle.

Ilmastolle ystävällisin turve-energian tuotantoketju on "suopelto-metsitys" (Kuva 29). Suopellon

käyttöönotto turvetuotantoon lopettaa sen suuret maatalouskäyttöön liittyvät päästöt, jolloin poltossa vapautuneet päästöt ja niiden siirtyminen nieluihin ja valtameriin (vrt. hiilen kierto) kompensoituu ajan kuluessa alkutilan päästöjen loppumisen takia. Tällöin turpeen hyödyntämisestä aiheutunut kasvihuonevaikutus alkaa pienentyä.

Kahtena tarkastelluista turvetketjuista ovat "visioketjut" (Kuva 29). Laskemalla näiden ketjujen kasvihuonevaikutus arvioidaan pienin mahdollinen turpeen kasvihuonevaikutuksen taso, joka voidaan saavuttaa eri vaiheiden päästöjen minimoimisella modernin teknologian avulla samalla kun turpeen tuotanto suunnataan alueille, jotka ovat parhaillaan suuria kasvihuonekaasujen lähteitä (suopellot ja metsäojitetut suot). Moderniin teknologiaan kuuluu mm. polttotekniikan parantaminen erityisesti typpioksiduulipäästöjen osalta sekä tuotantoajan lyhenemiseen ja tuotantokentän ja aumojen pääs-



Kuva 30. Eri energiantuotantoketjujen kasvihuonevaikutus sadan vuoden tarkasteluajalla turvemaankäyttöskemaarioissa ja kivihiiliskemaarioissa. Palkit kuvaavat kunkin ketjun kasvihuonevaikutusta ja vaakasuorat janat kuvaavat vaikutuksen epävarmuutta. Keltaisissa ja sinisissä palkeissa on esitetty, kuinka paljon kyseisissä ketjuissa on tuotettu energiaa turpeella ja kuinka paljon uusiutuvalla bioenergialla. Kasvihuonevaikutus (E_{abs}/E_{po}) on elinkaaren päästöjen ja nielujen aiheuttama kumulatiivinen säteilypakote sadassa vuodessa jaettuna polttoaineen energialla (UT= uusi turpeen tuotantomenetelmä).

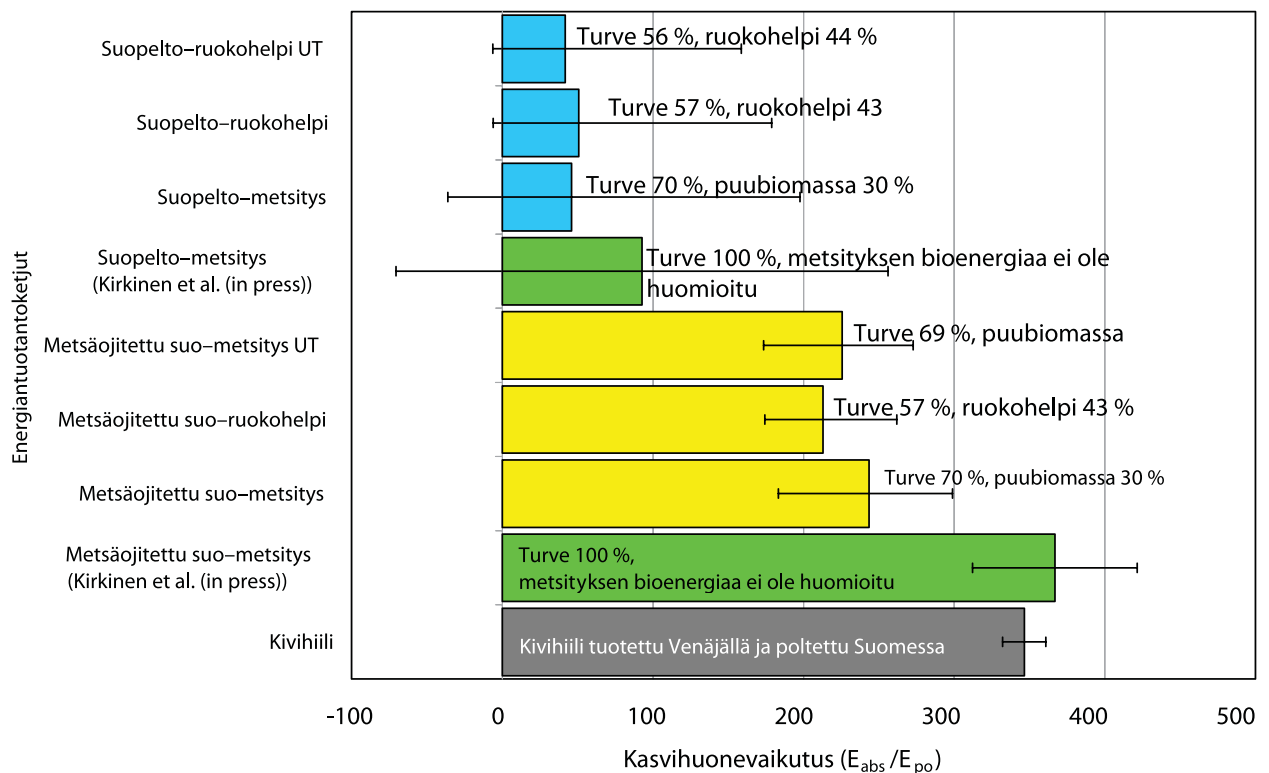
töjen pienentämiseen tähtäävän teknologian käyttöönotto (biomassakuivuri). Kuvasta 29 nähdään, että suopeltojen turvevarojen hyödyntämiseen perustuvan visioketju B:n kasvihuonevaikutus lähtee laskuun jo 100 vuoden kuluttua turpeen tuottamisesta ja päättyy lähes neutraaliksi 300 vuoden kuluessa.

Tutkimuksessa tarkasteltujen turvemaan hyödyntämisketjujen, joissa ensin turvemaahan hyödynnetään turvetuotantoon ja sitten alueen jälkikäsitellyssä alueella tuotetaan uusiutuvaa bioenergiaa, kasvihuonevaikutus 100 ja 300 vuoden ajalta on esitetty kuvissa 30 ja 31. Jos maapallon lämpötilan nousu halutaan rajoittaa 2–3 asteeseen, päästörajoitukset tulee tehdä lähivuosikymmeninä. Tällöin sadan vuoden tarkasteluajalla on tarkoituksenmukainen verrattaessa eri polttoaineiden kasvihuonevaikutusta.

Kuvassa 30 esitetään kasvihuonevaikutus turvemaan hyödyntämisestä energiaksi eri ketjuissa, joissa turpeen polton lisäksi tuotetaan uusiutuvaa energiaa (ruokohelpeä tai puubiomassaa) turvemaan pohjalla turpeen tuotannon jälkeen. Tarkasteluajana on 100 vuotta. Tuotantoaloina ovat vil-

jelyksessä oleva suoalue (suopelto) sekä metsäojitettu suo. Tarkasteluajalla on sata vuotta. Uusiutuvan energiantuotannon avulla saadaan turvemaan energiahyödyntämisen suhteellinen kasvihuonevaikutus pieneneväksi. Uusi turpeen tuotantoteknologia (UT) myös vähentää kasvihuonevaikutusta. Kuvassa on jokaisen ketjun kohdalla esitetty kuinka suuri osa ketjussa tuotetusta energiasta on tuotettu turpeella ja kuinka suuri osa uusiutuvalla biomassalla. Vaakasuorat janat kuvaavat kunkin ketjun kasvihuonevaikutuksen epävarmuutta.

Kuvassa 31 esitetään yhtäläisesti kuvan 30 tavoin turvemaan hyödyntämisen kasvihuonevaikutusta eri ketjuissa. Tarkasteluajanjaksona on 300 vuotta. Pitkällä aikavälillä erityisesti energiantuotantoketjujen, joissa tuotantovarana on suopelto, kasvihuonevaikutus alenee huomattavasti, kun aluetta ensin käytetään turvetuotantoon ja sitten pitkäaikaisesti uusiutuvan energian tuotantoon. Alhaisempi kasvihuonevaikutus verrattuna muihin ketjuihin johtuu suopellon merkittävien päästöjen välttämisestä, joka alentaa kokonaiskasvihuonevaikutusta.



Kuva 31. Eri energiantuotantoketjujen ilmastovaikutus 300 vuoden tarkasteluajanjaksolla. Palkit kuvaavat kunkin ketjun ilmastovaikutusta ja vaakasuorat janat ilmastovaikutuksen epävarmuutta. Keltaisissa ja sinisissä palkeissa on esitetty, kuinka paljon kyseisissä ketjuissa on tuotettu energiaa turpeella ja kuinka paljon uusiutuvalla bioenergialla. Katso myös kuvan 30 teksti.

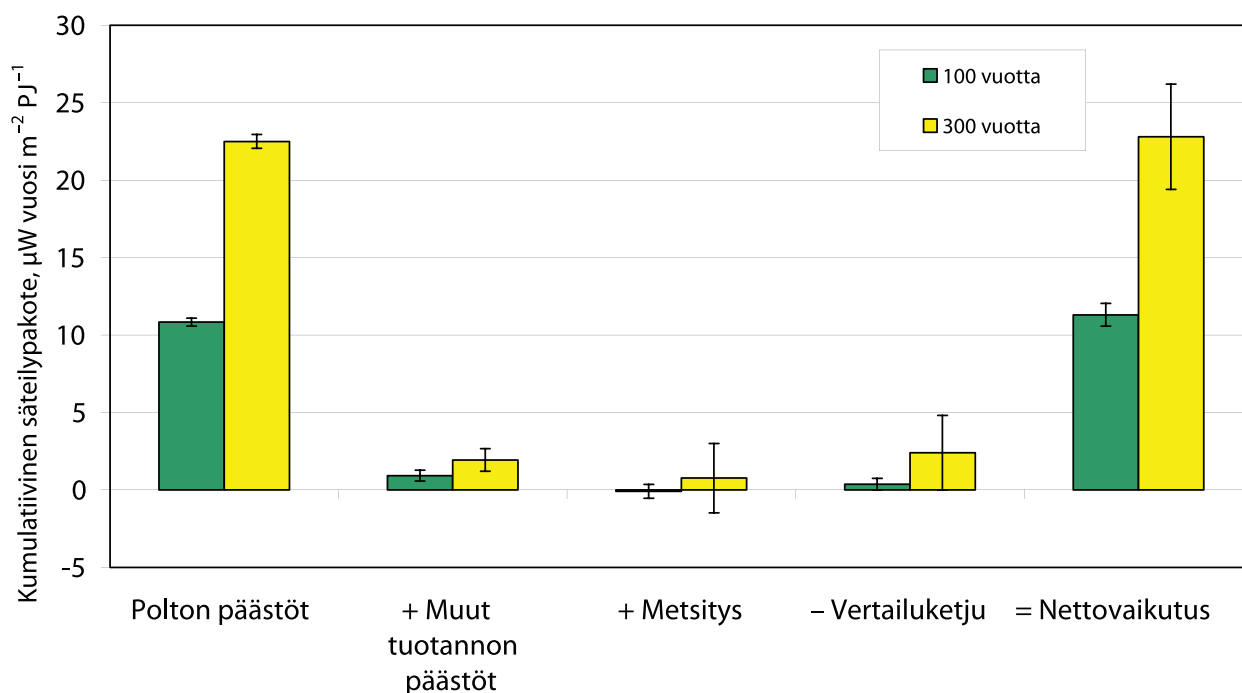
5.6. Herkkyysanalyysi

Herkkyysanalyysi auttaa tunnistamaan ne tekijät, jotka vaikuttavat eniten kasvihuonevaikutukseen. Herkkyysanalyysi on myös osa elinkaaritarkastelua. “Metsäojitettu suo-metsitys”-turve-energian tuotantoketjun integroitu kasvihuonevaikutus 300 vuoden ajalta vaihteittain esitetään kuvassa 31. Kasvihuonevaikutus on laskettu yhteen 100 ja 300 vuoden ajanjaksolta.

Epävarmuudet eri tuotantoketjun vaiheissa vaihtelevat suuresti (Kuva 32). Tarkemmin tiedetään ensimmäisen 20 vuoden aikana tapahtuvat polton ja tuotannon päästöt. Jatkokäyttövaihtoehdossa on otettu huomioon metsään sitoutuva hiili metsän keskimääräisen kiertoajan aikana. Pitkällä ajanjaksolla kuitenkin jäännösturpeen hajoaminen aiheuttaa suuremmat päästöt, kuin mitä metsä sitoo hiiltä, jolloin se lisää kasvihuonevaikutusta. Tähän liittyy kuitenkin suurta epävarmuutta, joka kasvaa tarkastelujakson pidentyessä. Erityisesti jäännösturpeen määrästä ja sen hajoamisnopeudesta on vähän tietoa. Jos otetaan huomioon metsitysvaiheen kasvihuonevaikutuksen epävarmuus, joka on tässä tapauksessa noin $\pm 20\%$, metsitysvaiheen kasvihuonevaikutus voi olla myös viilentävä.

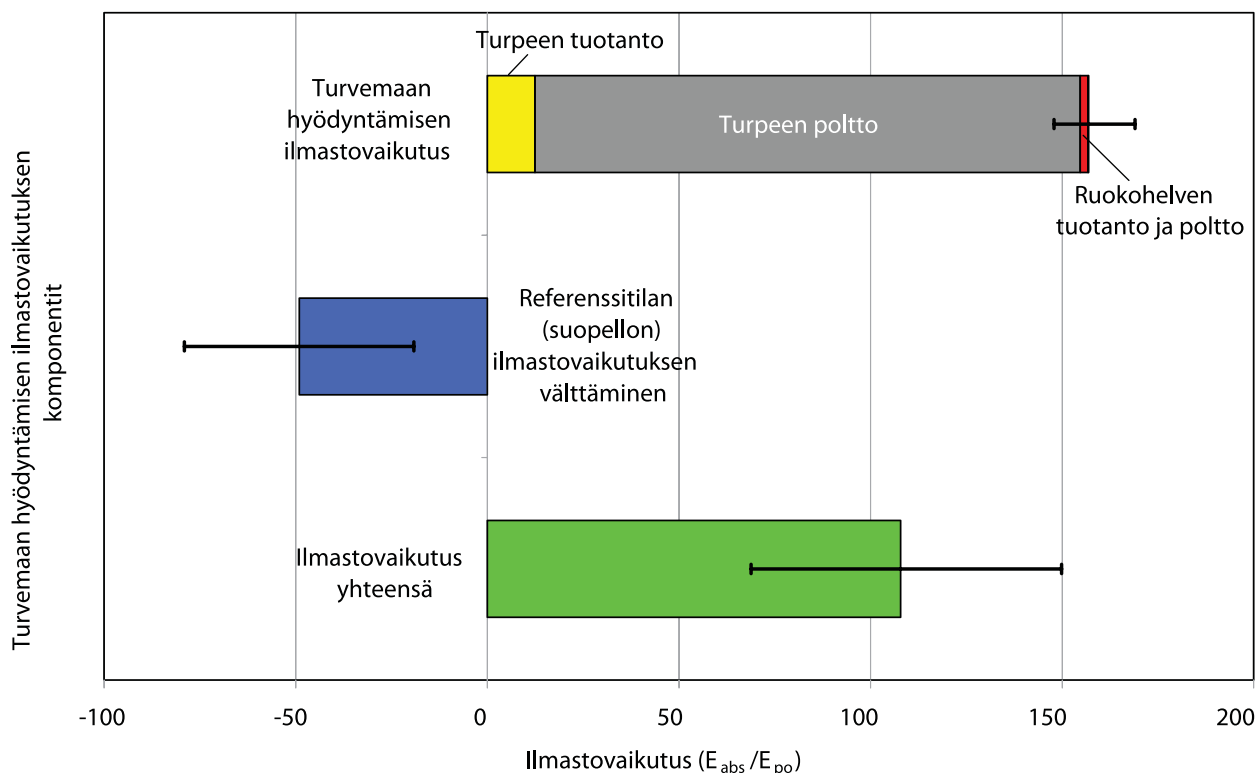
Kun turvemaata hyödynnetään kokonaisvaltaisesti energiantuotantoon, voidaan kasvihuonevaikutus jakaa eri komponentteihin (Kuva 33). Tarkastelu on sadan vuoden ajanjaksolta. Turpeen poltto aiheuttaa pääosin tuotantovaiheen kasvihuonevaikutuksen. Energian tuotanto ja polttovaiheen päästöt tiedetään tarkimmin, jonka vuoksi epävarmuus verrattuna suopeltojen päästöjen epävarmuuteen on selkeästi pienempi. Kun suopelto hyödynnetään energiantuotantoon, sieltä tulevilta päästöiltä välttyminen pienentää turvemaan hyödyntämisen kokonaiskasvihuonevaikutusta.

Energiaturpeen hyödyntämisen eri elinkaaren vaiheiden päästötiedot esitetään seuraavassa taulukossa (Taulukko 11). Positiivinen arvo kuvaa kaasun virtaa ilmakehään (päästö) ja negatiivinen kaasun sitoutumista (nielu). Turvemaan hyödyntämistarkasteluissa turpeen tuotantoalueen jälki-käytössä syntyvän puubiomassan tai viljellyn ruokohelven energiakäytön päästöt myös huomioitiin. Yksityiskohtaisempi kuvaus näistä päästöistä ja nieluista on esitetty Kirkisen ym. (2007) tutkimuksessa.



Polttoturpeen tuotantoketjujen vaiheet

Kuva 32. Metsäojitettu suo–metsitys -polttoturpeen tuotantoketjun kasvihuonevaikutus 100 ja 300 vuoden ajalta jaoteltuna eri vaiheisiin tuottaessa 1 PJ energiaa. Nettovaikutus lasketaan vähentämällä polton, muiden tuotannon päästöjen ja metsityksen nielujen/päästöjen aiheuttaman kasvihuonevaikutuksen summasta vertailuketjun päästöjen aiheuttama kasvihuonevaikutus. Pystysuuntaiset janat kuvaavat tuotantoketjun eri vaiheiden kasvihuonevaikutuksen epävarmuutta, joka aiheutuu lähtöarvojen epävarmuudesta (ks. lähtöarvot, Taulukko 10).



Kuva 33. Suopelto–ruokohelpi-energiantuotantoketjun ilmastovaikutus jaettuna eri komponentteihin sadan vuoden tarkastelujaksolla. Kuvassa on jaettu ilmastovaikutus energiantuotannon ja polton päästöihin, referenssitilan (suopellon) vältettyihin päästöihin sekä yhteenlaskettuun ilmastovaikutukseen. Kuvassa on esitetty suopelto–ruokohelpi-energiantuotantoketju skenaariolla A (Skenaariossa A ei ole mukana CO₂-sitoutumista eikä päästöjä ruokohelpiviljelmän maaperään). Katso myös kuvan 30 teksti.

Taulukko 11. Energiaturpeen elinkaaren eri vaiheiden kasvihuonekaasupäästöt ja -nielut. Positiivinen arvo kuvaa aineiden päästöä (ilmakehään) ja negatiivinen sitoutumista (ilmakehästä).

Tuotantovarant	Keskiarvo	Alaraja	Yläaraja	Lähde
Sarasuo				
Hiilidioksidi (CO ₂ , g m ⁻² a ⁻¹)	-73,34	0	-146,68	Saarnio ym. 2007
Metaani (CH ₄ , g m ⁻² a ⁻¹)	22,66	14,66	30,66	Martikainen ym. 1993
Typpioksiduuli (N ₂ O g m ⁻² a ⁻¹)	0	0	0	
Metsäojitettu suo				
Hiilidioksidi ¹⁾ (CO ₂ , g m ⁻² a ⁻¹)	224	-214	420	Minkkinen ym. 2006
Metaani (CH ₄ , g m ⁻² a ⁻¹)	0	0	0	Minkkinen ym. 2007b
Typpioksiduuli (N ₂ O g m ⁻² a ⁻¹)	0	0	0	Penttilä ym. 2007
Suopelto				
Hiilidioksidi (CO ₂ , g m ⁻² a ⁻¹)	1 760	705	2 815	Maljanen ym. 2007
Metaani (CH ₄ , g m ⁻² a ⁻¹)	-0,147	-0,263	-0,031	Maljanen ym. 2007
Typpioksiduuli (N ₂ O g m ⁻² a ⁻¹)	1,297	0,462	2,132	Maljanen ym. 2007
Turpeen hyödyntäminen				
Turvetuotantoalue				
Hiilidioksidi (CO ₂ , g m ⁻² a ⁻¹)	6,84	3,42	10,25	Alm ym. 2006
Metaani (CH ₄ , g m ⁻² a ⁻¹)	0,0039	0,0019	0,0058	Tilastokeskus 2005b
Aumaus				
Hiilidioksidi (CO ₂ , g m ⁻² a ⁻¹)	1,48	0,74	2,23	Nykänen ym. 1996
Työkoneet				
Hiilidioksidi (CO ₂ , g m ⁻² a ⁻¹)	1	0,5	1,5	Uppenberg ym. 2001
Poltto				
Hiilidioksidi (CO ₂ , g m ⁻² a ⁻¹)	105,9	105,3	106,5	Vesterinen 2003
Metaani (CH ₄ , g m ⁻² a ⁻¹)	0,0085	0,0064	0,0106	Tilastokeskus 2005
Typpioksiduuli (N ₂ O g m ⁻² a ⁻¹)	0,0128	0,0032	0,0224	Tilastokeskus 2005
Turvetuotantoalueen jälkikäyttö				
Metsitys				
Hiilen sitoutuminen kasvavaan biomassa ²⁾ (CO ₂ , g m ⁻² a ⁻¹)	-448	-359	-505	Penttilä ym. (julkaisematon)
Yläpuolisen karikkeen kertyminen ³⁾ (CO ₂ , g m ⁻² a ⁻¹)	-147	-122	-155	Penttilä ym. (julkaisematon)
Alapuolisen karikkeen kertyminen (CO ₂ , g m ⁻² a ⁻¹)	-15	0	-22	Penttilä ym. (julkaisematon)
Soistaminen				
Hiilidioksidi (CO ₂ , g m ⁻² a ⁻¹)	-121,6	27,9	-271,0	Alm ym. 2007
Metaani (CH ₄ , g m ⁻² a ⁻¹)	22,66	14,66	30,66	Alm ym. 2007
Typpioksiduuli (N ₂ O g m ⁻² a ⁻¹)	0	0	0	Alm ym. 2007

1) Sisältää vain maaperän hiilen muutoksen, ei muutoksia biomassan hiilessä (puusto, maaperän kasvillisuus).

2) Puusto sitoo hiiltä, kunnes metsän kiertoajan keskimääräinen hiilen varasto on saavutettu (5,5 kg C m⁻²).

3) Metsäkarike sitoo hiiltä, kunnes hiilen varasto (1,8 kg C m⁻²) on saavutettu.

5.7. Tulosten tarkastelu

Kasvihuonevaikutuksen tarkasteleminen elinkaarinäkökulmasta on erilainen lähestymistapa kuin päästöinventaario. Elinkaarinäkökulmassa pyritään arvioimaan toiminnon (tai tuotteen) kokonaisvaikutusta ottaen huomioon kaikki merkittävät päästöt ja nielut, jotka aiheutuvat toiminnosta (tai tuotteesta). Tavanomaisen tuotteen ollessa kysymyksessä päästöt aiheutuvat suurimmaksi osaksi muutaman kuukauden tai korkeintaan muutamman vuoden sisällä. Tällöin eri vuosille sattuvat päästöt lasketaan yhteen, eikä tarkastelussa kiin-

nitetä erityistä huomiota aikajänteeseen. Turvepolttoaineen tapauksessa suonpohjan soistaminen tai metsitys aiheuttaa jopa vuosisatoja kestäviä nielu- ja päästöprosesseja, minkä vuoksi tarkasteluun ja tulosten esittämiseen on järkevää tuoda selvä aikajänne mukaan. Koska tarkasteluun otetaan huomioon kaukana tulevaisuudessa olevia päästöjä ja nieluja, lopputulos ei ole yhteensopiva inventaariotarkastelun kanssa, jossa arvioidaan vain tarkasteluvuonna toteutuneet päästöt ja nielut. Lisäksi päästöinventaarioissa raportoidaan päästöt sektoreittain ja päästöluokittain, jolloin yhden toiminnon elinkaaren, kuten turpeen ener-

giakäytön päästöt jakautuvat useisiin päästöluokkiin (esimerkiksi poltto, korjuukoneet ja turvetuotantoalueen jatkokäyttö).

Sopivan aikajänteen valinta turve-energian elinkaaritarkasteluihin on ongelmallista. Suon turve uusiutuu hitaasti vuosituhansien kuluessa. Sen sijaan esim. metsä kasvaa vajaassa vuosisadassa. Ilmakehään vapautunut CO₂ poistuu hitaasti valtameriin sadan ja jopa satojen vuosien aikana. Toisaalta, jos pyritään pysäyttämään ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuuksien nousu YK:n ilmastopimuksen tavoitteen mukaisesti, tulee maailman kasvihuonekaasujen päästöt rajoittaa alle puoleen nykyisestä. Jos tavoitteena on Euroopan Unionin ehdottama kahden asteen rajoite maapallon keskilämpötilan nousulle, tulisi maailman päästöjen alentua puoleen noin 50 vuoden kuluessa. Tavallisesti käytetään eri kaasujen lämmitysvaikutusta kuvaavia GWP-kertoimia 100 vuoden integrointiajalla. Näin tehdään mm. ilmasto-

sopimukselle tehtävässä päästöjen raportoinnissa.

Tässä työssä on laskettu kumulatiivista kasvihuonevaikutusta 300 vuoteen saakka. On muistettava, että pitkälle ulottuviin tarkasteluajanjaksoihin liittyy epävarmuutta mm. ilmaston tai mahdollisen maankäytön muuttumisen johdosta.

Herkkyysanalyysissä tarkasteltiin päästöjä ja nieluja kuvaavien lähtöarvojen epävarmuuden tai vaihtelun vaikutusta tuloksiin. Tulosten absoluuttiseen tasoon vaikuttavat myös käytetyt pitoisuuden ja säteilypakotteen laskentaa kuvaavat mallit. Koska työssä käytettiin kuitenkin samoja laskentamalleja kaikille turveketjuille ja kivihiiliketjulle, lähtöarvojen eroja heijastavat suhteelliset erot eri ketjuja koskeissa tuloksissa ovat perusteltuja. Laskentamallit laadittiin vastaamaan IPCC:n kolmannessa arviointiraportissa (2001) käytettyjä arvioita.

5.8. Johtopäätökset

- Tutkimushankkeen tulosten perusteella ilmastoystävällisin turpeen hyödyntäminen perustuu maatalouskäytössä olevien turvemaiden hyödyntämiseen.
- Jos tarkastelussa huomioidaan vain turve, aiheuttaa metsäoijitettujen soiden tai sarasoiden hyödyntäminen turvetuotantoon karkeasti kivihiilen luokkaa olevan kasvihuonevaikutuksen. Jos turvemaata hyödynnetään ensin turvetuotantoon ja sen jälkeen pitkäaikaisesti uusiutuvan bioenergian tuotantoon, on metsäoijitetun suon hyödyntämisen kasvihuonevaikutus alempi kuin vastaavasti kivihiilen. Uusiutuvan bioenergian tuotto turpeentuotannosta vapautuvilla alueilla pienentää kasvihuonevaikutusta kokonaisuutena tuotettua energiamäärää kohti.
- Metsitys on jonkin verran ilmastoystävällisempi jatkokäyttövaihtoehto turpeen tuotantoalueen pohjalle kuin soistaminen ainakin tarkastellulla 300 vuoden aikajänteellä. Ruokohelven viljely on kasvihuonevaikutukseltaan metsityksen kanssa lähes samaa tasoa.
- Jäännösturpeen tarkalla keruulla, polttotekniikoiden parantamisella sekä uusilla turpeen korjuumenetelmillä saadaan turpeen kasvihuonevaikutusta selvästi pienennetyksi. Tuotanto- ja polttoteknologioita parantamalla turpeen kasvihuonevaikutus pienenee merkittävästi, ja turve on tällöin kivihiiltä ilmastoystävällisempi energian-lähde pitkällä aikavälillä tarkasteltuna.
- Tutkimushankkeessa tehtyjen herkkyystarkastelujen perusteella havaitaan, että itse turpeen polton aiheuttama kasvihuonevaikutus tunnetaan melko tarkasti. Koska kuitenkin tarkastellut ketjut yltyvät pitkälle tulevaisuuteen, tuloksiin liittyy paljon epävarmuutta. Tulokset ovat suhteellisen tarkkoja vain turpeen korjuun ja polton päästöjen osalta, mitkä tapahtuvat lähimmän 20 vuoden kuluessa. Turvetuotantoalueen tuotantoketjujen (energiantuotantovaran) ja niiden suonpohjien jatkokäyttömuotojen päästö- ja nielutiedoissa on suurimmat epävarmuudet. Päästöt ja nielut oletetaan tunnetuiksi 100 tai 300 vuotta eteenpäin. Näissä ei ole otettu huomioon ilmaston muuttumista eikä maankäytön muutoksia, jotka ovat varsin odotettavia näin pitkänä tarkasteluajana.

6. Tutkimusohjelman loppupäätelmät

- Tiedot maankäytön vaikutuksista suomen soiden KHK-taseisiin lisääntyivät merkittävästi tutkimusohjelman aikana, ja eräiltä osin käsitykset kasvihuonekaasujen päästöistä muuttuivat merkittävästi.
 - Metsäojitusalueiden aiemmin positiivisena pidetty turvemaan hiilidioksiditase muuttui uusien tulosten mukaan keskimäärin negatiiviseksi.
 - Sen sijaan tieto maatalouskäytössä olevien/olleiden soiden suurista hiilidioksidin ja typpioksiduulipäästöistä sai vahvistusta uusien tulosten perusteella.
 - Jossain määrin yllättävä oli havainto, että suopeltojen metsitys ei näytä pystyvän muuttamaan kokonaiskasvihuonekaasutasetta positiiviseksi, vaikka pienentääkin päästöjä.
- Ilmastositomukselle raportoitavassa päästöinventaariorissa pyritään mahdollisimman tarkasti esittämään ihmisen toiminnan aiheuttamat toteutuneet kasvihuonekaasujen päästöt ja nieltut tarkasteluvuonna. Näin voidaan seurata kasvihuonekaasujen päästöjen todellista kehitystä ja arvioida mm. Kioton pöytäkirjan velvoitteiden toteutumista.
- Kasvihuonevaikutuksen tarkasteleminen elinkaarinäkökulmasta käyttää erilaista lähestymistapaa kuin päästöinventaarior. Siinä pyritään arvioimaan tuotteen kokonaisvaikutusta ottaen huomioon kaikki merkittävät päästöt ja nieltut, jotka aiheutuvat tuotteesta. Tässä tutkimuksessa turpeen energiakäytön kasvihuonevaikutuksia on tarkasteltu elinkaarianalyysin näkökulmasta.
- Turpeen energiakäyttö aiheuttaa nykyisillä hyödyntämistavoilla suunnilleen kivihiilen luokkaa olevan kasvihuonevaikutuksen. Tuloksiin liittyy kuitenkin epävarmuutta pitkien tarkasteluajanjaksojen osalta. Kun huomioidaan turvemaan hyödyntäminen turvetuotannon jälkeen pitkäaikaisesti uusiutuvan bioenergian tuotantoon, aiheuttaa turvemaan energiakäyttö kivihiiltä pienemmän kasvihuonevaikutuksen.
- Turpeen kasvihuonevaikutusta voidaan edelleen vähentää merkittävästi suuntaamalla turpeen tuotanto maatalouskäytössä oleville/olleille turvemaille ja runsaspäästöisille metsäojitusalueille, jolloin kasvihuonevaikutus laskee pitkällä ajanjaksolla merkittävästi.
- Turve-energian kasvihuonevaikutusta saadaan pienemmäksi jäännösturpeen tarkalla keruulla, polttotekniikoiden parantamisella sekä uusilla turpeen korjuumenetelmillä. Uusiutuvan bioenergian tuotto turpeentuotannosta vapautuvilla alueilla pienentää kasvihuonevaikutusta kokonaisuutena tuotettua energiamäärää kohti. Metsitys on hieman ilmastoystävällisempi jälkikäyttövaihtoehto tuotannosta poisjääneelle suonpohjalle kuin soistaminen. Ruokohelven viljely tuottaa lähes saman ilmastovaikutuksen kuin metsitys.
- Soistamisella pyritään poistamaan ihmisen toiminnan vaikutus ja palauttamaan luonnontilaista vastaava tilanne. Siksi ennallistamista olisikin perusteltua pitää vain tilapäisenä maankäytön muutoksena ja ennallistetut suonpohjat voitaisiin tietyn määräajan jälkeen jättää KHK-inventoinnin ulkopuolelle samoin kuten oijittamattomat suot.
- Tieto soiden maankäytön kasvihuonevaikutuksista on edelleenkin hajanaista ja monilta osin puutteellista. Lisää mittaustietoa tarvitaan erityisesti puustoisten soiden hiilidioksidin nettovaihdosta (kokonaishiilitaseesta) maan etelä- ja pohjoisosissa erilaisilla turvemaatyypeillä sekä typpioksiduulin taseista rehevillä turvemaille, erityisesti suopelloilla. Suonpohjien KHK-taseista korjuun loputtua ja erilaisissa jälkikäyttömuodoissa on hyvin vähän tietoa, koska jälkikäyttöalueita on vasta muutamia. Alueiden osuus tulee kuitenkin kasvamaan merkittävästi tulevaisuudessa, ja tutkimusta tulisi lisätä tällä alueella.

Tutkimusohjelmassa julkaistut tutkimusartikkelit

Alm, J., Shurpali, N. J., Tuittila, E.-S., Laurila, T., Maljanen, M., Saarnio, S. & Minkkinen, K. 2007: Methods for determining emission factors for the use of peat and peatlands – flux measurements and modelling. *Boreal Env. Res.* 12: 85–100.

Alm, J., Shurpali, N. J., Minkkinen, K., Aro, L., Hytönen, J., Laurila, T., Lohila, A., Maljanen, M., Martikainen, P. J., Mäkiranta, P., Penttilä, T., Saarnio, S., Silvan, N., Tuittila, E.-S. & Laine, J. 2007: Emission factors and their uncertainty for the exchange of CO₂, CH₄ and N₂O in Finnish managed peatlands. *Boreal Env. Res.* 12: 191–209.

Kirkinen, J., Hillebrand, K., Savolainen, I. 2007. Turvemaan energiakäytön kasvihuonevaikutus – maankäyttöskenaario. Espoo 2007. VTT Tiedotteita 2365. 51s.

Kirkinen, J., Minkkinen, K., Penttilä, T., Kojola, S., Sievänen, R., Alm, J., Saarnio, S., Silvan, N., Laine, J. & Savolainen, I. 2007: Greenhouse impact due to different peat fuel utilisation chains in Finland – a life-cycle approach. *Boreal Env. Res.* 12: 211–223.

Lapveteläinen, T., Regina, K. & Perälä, P. 2007: Peat-based emissions in Finland's national greenhouse gas inventory. *Boreal Env. Res.* 12: 225–236.

Lohila, A., Laurila, T., Aro, L., Aurela, M., Tuovinen, J.-P., Laine, J., Kolari, P. & Minkkinen, K. 2007: Carbon dioxide exchange above a 30-year-old Scots pine plantation established on organic-soil cropland. *Boreal Env. Res.* 12: 141–157.

Maljanen, M., Hytönen, J., Mäkiranta, P., Alm, J., Minkkinen, K., Laine, J. & Martikainen, P. J. 2007: Greenhouse gas emissions from cultivated and abandoned organic croplands in Finland. *Boreal Env. Res.* 12: 133–140.

Minkkinen, K., Laine, J., Shurpali, N. J., Mäkiranta, P., Alm, J. & Penttilä, T. 2007a: Heterotrophic soil respiration in forestry-drained peatlands. *Boreal Env. Res.* 12: 115–126.

Minkkinen, K., Penttilä, T. & Laine, J. 2007b: Tree stand volume as a scalar for methane fluxes in forestry-drained peatlands in Finland. *Boreal Env. Res.* 12: 127–132.

Mäkiranta, P., Hytönen, J., Aro, L., Maljanen, M., Pihlatie, M., Potila, H., Shurpali, N. J., Laine, J., Lohila, A., Martikainen, P. J. & Minkkinen, K. 2007: Soil greenhouse gas emissions from afforested organic soil croplands and cutaway peatlands. *Boreal Env. Res.* 12: 159–175.

Saarnio, S., Morero, M., Shurpali, N. J., Tuittila, E.-S., Mäkilä, M. & Alm, J. 2007: Annual CO₂ and CH₄ fluxes of pristine boreal mires as a background for the lifecycle analyses of peat energy. *Boreal Env. Res.* 12: 101–113.

Yli-Petäys, M., Laine, J., Vasander, H. & Tuittila, E.-S. 2007: Carbon gas exchange of a re-vegetated cut-away peatland five decades after abandonment. *Boreal Env. Res.* 12: 177–190.

Oheiskirjallisuutta

Ahlholm, U. & Silvola, J. 1990: CO₂ release from peat-harvested peatlands and stockpiles. – Proceedings of PEAT 90 –versatile peat. – International Conference on Peat Production and Use, June 11–15, 1990, Jyväskylä, Finland. Association of Finnish Peat Industries, University of Jyväskylä, Continuing Education Centre. Volume 2, Posters: 1–12.

Alm J, Talanov A, Saarnio S, Silvola J, Ikkonen E, Aaltonen H, Nykänen H, Martikainen PJ 1997. Reconstruction of the carbon balance for microsites in a boreal oligotrophic pine fen, Finland. *Oecologia* 110: 423–431.

Aro L. & Kaunisto S. 2003. Jatkolannoituksen ja kasvatustiheyden vaikutus nuorten mäntymetsiköiden ravinnetilaan sekä puuston ja juuriston kehitykseen paksuturpeisella suonpohjalla. Summary: Effect of refertilisation and growing density on the nutrition, growth and root development of young Scots pine stands in a peat cutaway area with deep peat layers. *Suo* 54(2): 49–68.

Aro, L., Kaunisto, S. & Saarinen, M. 1997. Suopohjien metsitys. Hankeraportti 1986–1995. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 634. 51 s.

- Crill P.M., Martikainen P.J., Nykänen H. & Silvola J. 1994. Temperature and N fertilization effects on methane oxidation in a drained wetland soil. *Soil Biol. Biochem.* 26: 1331–1339.
- Davidson E.A., Belk E. & Boone R.D. 1998. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biol.* 4(2): 217–227.
- Hillebrand K. 1993. The greenhouse effects of the peat production and use compared with coal, oil, natural gas and wood. VTT, Tiedotteita 1494: 1–50.
- Holmgren, K., Kirkinen, J., Savolainen, I. 2006. The climate impact of energy peat utilisation – comparison and sensitivity analysis of Finnish and Swedish results. IVL Swedish Environmental Institute Report B1681, 72p.
- Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Dai X., Maskell K. and Johnson C.A. (eds.) 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Published for the IPCC by the Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 881 s. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.htm>.
- Hynönen T. 1997. Turvemaapellojen metsitystulos Pohjois-Savossa. *Metsätieteen aikakauskirja – Folia For.* 2/1997: 181–189.
- Hytönen J. 1999. Pellonmetsityksen onnistuminen Keski-Pohjanmaalla. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/1999: 697–710.
- Hytönen J. & Wall A. 1997. Metsitysten turvepeltojen ja viereisten suometsien ravinne määrät. Summary: Nutrient amounts of afforested peat fields and neighbouring peatland forests. *Suo* 48: 33–42.
- Hytönen, J. & Ekola, E. 1993. Maan ja puuston ravinnetila Keski-Pohjanmaan metsityillä pelloilla. Soil nutrient regime and tree nutrition on afforested fields in central Ostrobothnia, western Finland. *Folia Forestalia* 822. 32 s.
- IPCC 2001. Kirjassa: *Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change.* Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Dai X., Maskell K., Johnson C.A. (Toim.). Cambridge University Press, Cambridge. 881s.
- IPCC. 1996. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Reference manual.
- ISO 14040 1997. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland. 12 s. ISO 14040. (1997).
- Karsisto M. 1979. Maanparannusaineiden vaikutuksista orgaanista ainetta hajottavien mikrobien aktiivisuuteen suometsissä. Osa II. Tuhkalannoituksen vaikutus. Summary: Effect of forest improvement measures on activity of organic matter decomposing micro-organisms in forested peatlands. Part II. Effect of ash fertilization. *Suo* 3: 81–91.
- Kasimir-Klemedtsson Å, Klemedtsson L, Berglund K, Martikainen PJ, Silvola J, Oenema O 1997. Greenhouse gas emissions from farmed organic soils: a review. *Soil Use Manage* 13: 245–250.
- Kaunisto, S. & Paavilainen, E. 1988. Nutrient stores in old drainage areas and growth of stands *Commun. Inst. For.Fenn.* 145.
- Kauppa- ja teollisuusministeriö 2001. Kansallinen ilmastostrategia: Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle. Julkaisu 1/2001. 96 s.
- Klemedtsson L, von Arnold K, Weslien P, Gundersen P 2005. Soil CN ratio as a scalar parameter to predict nitrous oxide emissions. *Global Change Biol.* 11: 1142–1147.
- Kroeze C., Mosier A. & Bouwman L. 1999. Closing the global N₂O budget: a retrospective analysis 1500–1994. *Global Biogeochem. Cycles* 13: 1–8.
- Lloyd J. & Taylor J.A., 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology* 8: 315–323.
- Lohila A, Aurela M, Tuovinen J-P, Laurila T 2004. Annual CO₂ exchange of a peat field growing spring barley or perennial forage. *J. Geophys. Res.* 109 D18116, doi:10.1029/2004JD004715.

- Maljanen M, Komulainen V-M, Hytönen J, Martikainen PJ, Laine J 2004. Carbon dioxide, nitrous oxide ja methane dynamics in boreal organic agricultural soils with different soil management. *Soil Biol. Biochem.* 36: 1801–1808.
- Maljanen M, Liikanen A, Silvola J, Martikainen PJ 2003a. Methane fluxes on agricultural ja forested boreal organic soils. *Soil Use Manage* 19: 73–79.
- Maljanen M, Liikanen A, Silvola J, Martikainen PJ 2003b. Nitrous oxide emissions from boreal organic soil under different land-use. *Soil Biol. Biochem.* 35: 689–700.
- Maljanen M, Martikainen PJ, Walden J, Silvola J 2001. CO₂ exchange in an organic field growing barley or grass in eastern Finland. *Global Change Biol.* 7: 679–692.
- Maljanen M., Hytönen J. & Martikainen P.J. 2001b. Fluxes of N₂O, CH₄ and CO₂ on afforested boreal agricultural soils. *Plant Soil* 231: 113–121.
- Maljanen, M., Komulainen, V-M., Hytönen, J., Martikainen, P.J. & Laine, J. 2004. Carbon dioxide, nitrous oxide and methane dynamics in boreal organic agricultural soils with different soil management. *Soil Biol. Biochem.* 36: 1801–1808.
- Maljanen, M., Liikanen, A., Silvola, J. & Martikainen P.J. 2003. Methane fluxes on agricultural and forested boreal organic soils. *Soil Use Manage.* 19: 73–79.
- Maljanen, M., Martikainen, P.J., Walden, J. & Silvola, J. 2001a. CO₂ exchange in an organic field growing barley or grass in eastern Finland. *Global Change Biol.* 7: 679–692.
- Martikainen, P.J., Nykänen, H., Alm, J. & Silvola, J. 1995. Change in fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide due to forest drainage of mire sites of different trophy. *Plant Soil* 168–169, 571–577.
- Martikainen, P.J., Nykänen, H., Crill, P. & Silvola, J. 1993. Effect of a lowered water table on nitrous oxide fluxes from northern peatlands. *Nature* 366 (4): 51–53.
- Metsätilastollinen vuosikirja 2004. SVT Maa-, metsä- ja kalatalous 2004: 45.
- Minkinen, K. & Laine, J. 1998. Long term effect of forest drainage on the peat carbon stores of pine mires in Finland. *Can. J. For. Res.* 28: 1267–1275.
- Monni, S., Korhonen, R. & Savolainen, I. 2003. Radiative forcing due to anthropogenic greenhouse gas emissions from Finland: Methods for estimating forcing of a country or an activity. *Environmental Management* 31(3): 401–411.
- Montaranella, L., Jones, R.J.A. & Hiederer, R. 2006. The distribution of peatland in Europe. *Mires and Peat* 1, Article 01, <http://www.mires-and-peat.net>, ISSN 1819-745X. International Mire Conservation Group and International Peat Society.
- Myllylä I. 2005. Biomassakuivuri uudistaa turvetuotantoa. *Vapoviesti. Vapo-konsernin asiakaslehti* 1/2005: 7–11.
- Myllys, M. & Sinkkonen, M. 2004. Viljeltyjen turve- ja multamaiden pinta-ala ja alueellinen jakauma Suomessa. Summary: The area and distribution of cultivated peat soils in Finland. *Suo* 55: 53–60.
- Nilsson K. & Nilsson M. 2004. The Climate Impact of Energy Peat Utilisation in Sweden – the Effect of former Land-use and After-treatment. IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd. IVL Report B1606. Tukholma. 91 s.
- Nykänen H., Alm J., Lång K., Silvola J. & Martikainen P.J. 1995. Emissions of CH₄, N₂O and CO₂ from a virgin fen and a fen drained for grassland in Finland. *Journal of Biogeography* 22: 351–357.
- Nykänen H., Silvola, J., Alm, J. & Martikainen, P.J. 1996. Fluxes of greenhouse gases CH₄, CO₂ and N₂O on some peat mining areas in Finland. In: Laiho R, Laine J, Vasander H ed. *Northern Peatlands in global climatic change, Proceedings of the International Workshop held in Hyytiälä, Finland, 8–12 October 1995.* Helsinki: Oy Edita Ab, 1996: 141–147. Publications of the Academy of Finland 1/96/1996.
- Pakkanen S. 2005. Vapo kuivattaa biomassaa aurinkoenergialla. *Tekniikka & Talous* 18: 27.

- Pessi Y. 1956. Studies on the effect of the admixture of mineral soil upon the thermal conditions of cultivated peat land. State Agricultural Research Publications of Finland 147.
- Pessi Y. 1962. The pH –reaction of the peat in long-term soil improvement trials at the Leteensuu experimental station. *Maataloustieteellinen aikakausikirja* 34 (1): 44–54.
- Regina, K., Pihlatie, M., Esala, M. & Alakukku, L. 2006. Methane fluxes on boreal arable soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment* (submitted).
- Regina K, Syväsalto E, Hannukkala A, Esala M 2004. Fluxes of N₂O from farmed peat soils in Finland. *Eur. J. Soil Sci.* 55: 591–599.
- Savolainen I., Hillebrand K., Nousiainen I. & Sinisalo J. 1994. Greenhouse impacts of the use of peat and wood for energy. *VTT, Tiedotteita* 1559: 1–65.
- Selin, P. 1999. Turvevarojen teollinen käyttö ja suonpohjien hyödyntäminen Suomessa. Summary: Industrial use of peatlands and the re-use of cut-away areas in Finland PhD thesis. Jyväskylä Studies in Biological & Environmental Science 79. University of Jyväskylä.
- Statistics Finland 2005a. Greenhouse gas emissions in Finland 1990–2003. National Inventory Report to the UN-FCCC. 27.05.2005. 213 s.
- Tilastokeskus 2005. Kasvihuonekaasuinventaario; Suomen kasvihuonekaasupäästöjen yhteenvedot 1990–2003. Statistics Finland, Helsinki. Saatavana verkosta: http://tilastokeskus.fi/tup/khkinv/khkaasut_raportit_yht.html.
- Tuittila E-S., Komulainen V-M., Vasander H. & Laine J. 1999. Restored cut-away peatland as a sink for atmospheric CO₂. *Oecologia* 120: 563–574.
- Urvas, L. 1985. Viljelyn vaikutus turpeen ravinnepitoisuuteen. Summary: Effect of cultivation on the nutrient status of peat soils. *Suo* 36(3): 61–64.
- Wall A. & Heiskanen J. 1998. Physical properties of afforested former agricultural peat soils in western Finland. *Suo* 49: 1–2.
- Wall A. & Hytönen J. 1996. Painomaan vaikutus metsitetyn turvepellon ravinnemääriin. Summary: Effect of mineral soil admixture on the nutrient amounts of afforested peatland fields. *Suo* 47: 78–83.
- Watson, R.T. & Core Writing Team (eds.) 2001. *Climate Change 2001: Synthesis Report*. Stand-alone edition, IPCC, Geneva, Switzerland.
- Vesterinen R. 2003. Estimation of CO₂ emission factors for peat combustion on the basis of analyses of peat delivered to power plants. Research report PRO2/P6020/03. VTT Processes, Energy Production. Jyväskylä. 25 s. + liitt. 5 s.
- Virtanen K & Hänninen P. 2004. Peat resources of Finland. In: Päivänen J. (ed.). *Wise Use of Peatlands. Proceedings of the 12th International Peat Congress, Volume 2, Poster Presentations*, pp. 940–944.

LIITE

Turpeen ja turvemaiden käytön kasvihuonevaikutukset Suomessa

-tutkimusohjelman osahankkeet ja niiden tutkijat

Koordinointihanke

Prof Jukka Laine (Metla, Parkano), MMT Kari Minkkinen (HY), Dos. Jukka Alm (Metla, Joensuu)

Mallien kehittäminen ja alueelliset laskelmat

Jukka Alm (Metla, Joensuu), N.J. Shurpali (Metla, Joensuu), Sanna Saarnio (JoY), Micaela Morero (JoY), Jukka Laine (Metla, Parkano), Högne Jungner (HY), Kari Minkkinen (HY), Markku Mäkilä (GTK), Eeva-Stiina Tuittila (HY), Harri Vasander (HY)

Mittausten laatu järjestelmä

Kari Minkkinen (HY), Jouni Meronen (HY)

Puustoisten turvemaiden hiilidioksidin nettovaihto

Tuomas Laurila (Ilmatieteen laitos), Annalea Lohila (Ilmatieteen laitos), Mika Aurela (JoY), Tea Thum, Jukka Laine (Metla, Parkano), Lasse Aro (Metla, Parkano), Kari Minkkinen (HY), Timo Penttilä (Metla, Vantaa), Juha-Pekka Tuovinen (Ilmatieteen laitos), Terhi Riutta (HY), Janne Rinne (HY), Mari Pihlatie (HY), Timo Vesala (HY)

Luonnon tilaisten soiden kasvihuonekaasutaseet

Sanna Saarnio (JoY), Micaela Morero (JoY), Jukka Alm (Metla, Joensuu), Högne Jungner (HY, ajoituslaboratorio), Jukka Laine (Metla, Parkano), Markku Mäkilä (GTK, Espoo), Eloni Sonninen (HY, ajoituslaboratorio), Eeva-Stiina Tuittila (HY, metsäekologian laitos), Harri Vasander (HY, metsäekologian laitos)

Metsäojitettujen soiden kasvihuonekaasutaseet

Kari Minkkinen (HY), Jukka Laine (Metla, Parkano), Raija Laiho (HY), Päivi Mäkiranta (HY), Timo Penttilä (Metla, Vantaa), Marjut Karsisto (Metla, Vantaa), Risto Sievänen (Metla, Vantaa), Mike Starr (Metla, Vantaa), Veikko Kitunen (Metla, Vantaa), Teija Dahlin (Metla, Rovaniemi), Mauri Heikkinen (Metla, Rovaniemi), Timo Törmänen (Metla, Rovaniemi).

Metsitettyjen suopeltojen ja suonpohjien KHK-taseet

Jyrki Hytönen (Metla, Kannus), Lasse Aro (Metla, Parkano), Jukka Laine (Metla, Parkano), Marja Maljanen (KY), Jukka Alm (JoY), Päivi Mäkiranta (Metla, Kannus), Pertti J. Martikainen (KY), Hannamaria Potila (Metla, Parkano), Kari Minkkinen (HY), Mari Pihlatie (HY), Narasinha Shurpali (JoY)

Viljelyssä ja peltöheittoina olevien suopeltojen KHK-emissiot

Pertti Martikainen (KY), Marja Maljanen (KY), Hannu Nykänen (KY), Martti Esala (MTT), Jyrki Hytönen (Metla, Kannus), Päivi Mäkiranta (Metla, Kannus), Jukka Alm (JoY), Kari Minkkinen (HY), Jukka Laine (Metla, Parkano)

Suonpohjien soistaminen

Eeva-Stiina Tuittila (HY), Jukka Laine (Metla, Parkano), Harri Vasander (HY), Kari Minkkinen (HY), Kari Kukko-Oja (Metla, Muhos), Jukka Alm (Metla, Joensuu), Sanna Saarnio (JoY), Mirva Leppälä (Metla, Muhos), Mika Yli-Petäys (HY), Sanna Kivimäki (HY)

Säteilypakote- ja elinkaarianalyysimallit

Ilkka Savolainen (VTT), Riitta Korhonen (VTT), Johanna Kirkinen (VTT)

Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja



- 1/2007 Suomen ilveskannan hoitosuunnitelma
ISBN 978-952-453-312-6
- 1a/2007 Förvaltningsplan för Finlands lodjursstam
ISBN 978-952-453-336-2
- 1b/2007 Management plan for the lynx population in Finland
ISBN 978-952-453-340-9
- 2/2007 Suomen karhukannan hoitosuunnitelma
ISBN 978-852-453-313-3
- 2a/2007 Management plan for the bear population in Finland
ISBN 978-952-453-341-6
- 3/2007 Maatalouspolitiikan vaihtoehdot
ISBN 978-952-453-316-4
- 4/2007 Itämeren hyljekantojen hoitosuunnitelma
ISBN 978-952-453-329-4
- 4a/2007 Förvaltningsplan för Östersjöns sälstammar
ISBN 978-952-453-337-9
- 5/2007 Kansallinen metsäohjelma 2010 - Seurantaraportti
2005-2006
ISBN 978-952-453-330-0
- 5a/2007 Finlands nationella skogsprogram 2010 –
Uppföljningsrapport 2005–2006
ISBN 978-952-453-331-7 Vain verkkojulkaisu
- 5b/2007 Finland's National Forest Programme 2010 – Follow-up
report 2005–2006
ISBN 978-952-453-332-4 Vain verkkojulkaisu
- 6/2007 Eläimistä saatavia elintarvikkeita koskevan lainsäädännön
sekä sen toimeenpanon ja soveltamisen vaikutukset
pienien ja keskisuurten elintarvikeyritysten toimintaan
ISBN 978-952-453-335-5
- 7/2007 Suomen metsät 2007 Kestävän metsätalouden
kriteereihin ja indikaattoreihin perustuen
ISBN 978-952-453-339-3
- 8/2007 Manner-Suomen maaseudun kehittämisohjelma 2007–2013
ISBN 978-952-453-342-3
- 9/2007 Suomen metsäpeurakannan hoitosuunnitelma
ISBN 978-952-453-343-0
- 10/2007 Suomen peltopyykannan hoitosuunnitelma
ISBN 987-952-453-344-7